

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**“ANÁLISIS DEL MODELO DEL BALANCE DE  
AGUAS DEL TRANQUE DE RELAVES LAGUNA  
SECA Y DE SU IMPACTO ECONÓMICO EN LOS  
PROCESOS DE MINERA ESCONDIDA  
LIMITADA”**

**Dafne Celis Sepúlveda**

Profesor(es) Guía(s):  
Jaime Fernández Celis  
José Torres Titus

**2012**

## RESUMEN

El recurso hídrico tiene un rol principal en los procesos mineros, y toma una mayor importancia en zonas desérticas como el norte de Chile. Minera Escondida Limitada, ubicada en el desierto de Atacama a 170 [km] al sureste de la ciudad de Antofagasta, está consciente de la importancia de este recurso, y una de sus principales preocupaciones es proporcionar su uso adecuado y eficiente.

En los requerimientos de los procesos de las dos plantas concentradoras de Minera Escondida Limitada, se procesa diariamente 240.000 toneladas de mineral y se utiliza 1[m<sup>3</sup>] de agua por tonelada de mineral procesado, lo cual se traduce en un costo de consumo de agua de 192.000[US\$/día] donde el mayor consumo de agua es proveniente del suministro de agua fresca, el cual representa un 63% del total del agua utilizada, le sigue el consumo de agua recuperada con un 30% y en menor parte, con un 7%, el agua desalinizada. Siendo el agua recuperada la de menor costo, de 0,44[US\$/ton], frente a los 0,61[US\$/ton] del agua fresca y los 4,1[US\$/ton] del agua desalinizada. La curva que relaciona la variación porcentual de agua recuperada con el costo de consumo de agua total, muestra que al aumentar el agua recuperada se disminuyen los costos, un aumento al 40% de agua recuperada significa una disminución de aproximadamente un 8% en los costos totales de consumo de agua, lo que hace importante estudiar formas de aumentar la disponibilidad de esta fuente. Frente al elevado costo del agua desalinizada, las normativas ambientales existentes que limitan la extracción de agua fresca, y el beneficio económico que representa un aumento del agua recuperada, hace que esta última fuente tenga un rol protagónico, siendo el Tranque de Relaves Laguna Seca, su principal fuente de extracción.

La Superintendencia de Aguas y Tranque en conjunto con la empresa asesora Arcadis, han desarrollado un conjunto de ecuaciones con el objetivo de representar el comportamiento

hídrico del tranque de relaves Laguna Seca, nombrado como “Modelo del balance de aguas del tranque de relaves Laguna Seca”, el cual es el encargado de entregar las proyecciones, mensuales y anuales, de agua recuperada. Sin embargo este modelo, no cuenta con una validación de las proyecciones históricas entregadas que permitan conocer como es su comportamiento respecto a la realidad. Un buen comportamiento de estos datos permitiría a la Superintendencia tener un mejor manejo y control del agua recuperada desde el tranque.

Se analizó el comportamiento de este modelo respecto a la realidad, mediante un análisis estadístico, entregando, de forma anual y mensual, una diferencia significativa entre el modelo y lo real. Esta diferencia, condujo al estudio del modelo en general, apuntando a la búsqueda de oportunidades de mejoras que este presentara, y entregando propuestas que permitan una mejor precisión del modelo. De las propuestas de mejoras se destacan las siguientes: enfocar el modelo a la optimización de la operación del tranque, encontrar el volumen mínimo de la laguna para así conocer el stock de agua disponible a recuperar desde la laguna, considerar la variación de volumen de la laguna en el tiempo y mejorar la medición de la tasa de evaporación en las playas activas y en la laguna utilizando tecnología satelital.

La mejor precisión del modelo, no solo permite un mejor manejo del agua recuperada desde el tranque, sino también, implica no tener costos asociados que generen un aumento del costo de consumo de agua total, de un 3,10% hasta un 20,85% más, dependiendo de la fuente de agua, lo que en el peor de los casos se traduce en US\$14.000.000 anuales.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	II
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X

## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Antecedentes Minera Escondida Limitada. ....	1
1.1.1 Operaciones MEL.....	3
1.2 Superintendencia de Aguas y Tranque .....	4
1.2.1 Área Aguas .....	5
1.2.2 Área Planta desalinizadora .....	6
1.2.3 Área Tranque .....	7
1.2.4 Suministros de agua.....	9

## CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

2.1 Descripción del Problema.....	11
2.2 Objetivos.....	12
2.2.1 Objetivo General .....	12

2.2.2	Objetivos Específicos .....	12
2.3	Metodología .....	12
CAPÍTULO III: ASPECTOS TEÓRICOS DE LOS TRANQUES DE RELAVES		
3.1	Construcción y Operación del Tranque .....	15
3.1.1	Muro del tranque .....	16
3.1.2	Operación del tranque.....	18
3.1.3	Recuperación de agua.....	20
3.1.4	Cierre de tranques.....	20
3.1.5	Normas de construcción y operación .....	21
CAPÍTULO IV: CONSUMO DE AGUA		
4.1	Análisis del Consumo de Agua.....	23
4.1.1	Costo consumo de agua alimentada promedio en el día.....	25
4.1.2	Costo consumo de agua alimentada promedio en el día no utilizando agua desalinizada.....	26
4.1.3	Costo agua alimentada promedio en el día no utilizando agua de pozos .....	27
4.1.4	Efecto en el costo por la variación en el agua recuperada.....	28
CAPÍTULO V: MODELO DEL BALANCE DE AGUAS DEL TRANQUE DE RELAVES LAGUNA SECA		
5.1	Ingreso de Agua .....	33
5.2	Salidas de Aguas y pérdidas .....	34
5.2.1	Pérdidas por retención de agua en el relave depositado .....	34
5.2.2	Pérdidas por evaporación de agua desde la playa activa.....	35
5.2.3	Pérdida por evaporación desde la laguna .....	37

5.2.4	Pérdidas por infiltración desde la laguna.....	38
5.2.5	Pérdidas por resaturación de playas inactivas .....	39

## CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE DATOS

6.1	Análisis Anual.....	42
6.1.1	Análisis Estadístico Anual.....	44
6.2	Análisis Mensual.....	47
6.2.1	Análisis estadístico mensual de los últimos cuatro años fiscales .....	48
6.2.2	Análisis estadístico mensual de cada año fiscal .....	49
6.2.3	Análisis de comportamiento de curva mensual .....	51

## CAPÍTULO VII: PROPUESTAS DE MEJORAS

7.1	Propuestas de Mejoras al Modelo.....	57
7.2	Propuestas de Mejoras Específicas al Modelo.....	60
7.2.1	Cálculo de pérdidas por evaporación .....	60
7.2.1.1	Instalación de evaporímetros.....	60
7.2.1.2	Aplicación de Tecnología Satelital .....	62
7.2.1.3	Inclusión modelo SEBAL .....	63
7.2.1.4	Calibración áreas playas activas, inactivas y laguna.....	66
7.2.2	Incorporación plan de depositación.....	70
7.2.3	Cálculo pérdidas por infiltración .....	70
7.2.4	Cálculo pérdidas por resaturación .....	71
7.3	Propuestas de Mejoras a la Plataforma .....	72
7.4	Propuestas de Mejoras Externas .....	72

## CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE COSTOS ASOCIADOS

8.1	Costos Asociados a la Sensibilidad .....	75
8.2	Costos Asociados a las Proyecciones .....	79
8.1.1	Intervalo de confianza .....	79
8.1.2	Cálculo de costos asociados .....	80
CONCLUSIONES .....		83
GLOSARIO .....		86
BIBLIOGRAFÍA .....		88
ANEXOS .....		89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Plano de ubicación de Minera Escondida Limitada .....	2
Figura 2: Proceso Minera Escondida Ltda.....	3
Figura 3: Diagrama Tranque de Relaves Laguna Seca.....	8
Figura 4: Esquema de las partes de un tranque de relaves.....	14
Figura 5: Riesgos de un suelo no resistente. ....	16
Figura 6: Ciclonaje en el muro del tranque.....	17
Figura 7: Método de construcción “Aguas abajo” .....	17
Figura 8: Revancha del muro.....	18
Figura 9: Riesgo de la laguna cerca del muro.....	19
Figura 10: Rebase de la laguna por no control de la revancha .....	19
Figura 11: Diagrama de distribución de aguas .....	24
Figura 12: Balance de Agua Superficial .....	30
Figura 13: Saturación y secado de playas .....	39
Figura 14: Curva de contenidos de humedad.....	40
Figura 15: Curva de volumen de la laguna a operación óptima [ $Mm^3$ ].....	59
Figura 16: Obtención curva $dV/dt$ a operación óptima [ $Mm^3$ ].....	59
Figura 17: Descripción general de funcionamiento del algoritmo SEBAL.....	64
Figura 18: Zonas del tranque de relaves .....	69



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Suministros de aguas de Minera Escondida Limitada.....	10
Gráfico 2: Costo de agua alimentada a concentradoras .....	28
Gráfico 3: Variación del costo del consumo de agua con variación de agua recuperada .....	29
Gráfico 4: Curva de agua recuperada con datos históricos mensuales promediados por año fiscal.....	43
Gráfico 5: Curva de agua recuperada mensual en [m <sup>3</sup> /mes].....	47
Gráfico 6: Flujo de agua recuperada mensual del FY11 en [l/s] .....	52
Gráfico 7: Flujo de agua recuperada en [l/s] para análisis de sensibilidad.....	76
Gráfico 8: Efecto en el costo de consumo de agua por la sensibilidad.....	77
Gráfico 9: Agua recuperada [l/s] del FY11 junto al intervalo de confianza.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Costo de los distintos suministros de agua .....	25
Tabla 2: Cálculo de la relación k para análisis anual.....	44
Tabla 3: Cálculo de diferencias para análisis estadístico anual .....	45
Tabla 4: Valores estadísticos para análisis anual.....	46
Tabla 5: Cálculo de diferencias para análisis estadístico mensual .....	48
Tabla 6: Valores estadísticos para análisis mensual .....	49
Tabla 7: Valores estadísticos para análisis mensual de cada año fiscal.....	50
Tabla 8: Valor de t calculada y t estadístico por año fiscal .....	51
Tabla 9: Temperaturas en [°C] y Tasa de evaporación en [mm/día] en el FY11 .....	53
Tabla 10: Rangos por pixel para la clasificación de áreas.....	68
Tabla 11: Cálculo del costo de consumo de agua fuera del Intervalo de Confianza .....	81

# CAPÍTULO I

## 1. ANTECEDENTES GENERALES

### 1.1 Antecedentes Minera Escondida Limitada.

Minera Escondida Limitada, o MEL, es una sociedad de responsabilidad limitada, constituida por escritura pública de fecha 14 de agosto de 1985 que opera únicamente en Chile y tiene su sede en la ciudad de Antofagasta.

El descubrimiento de Escondida se produjo el 14 de marzo de 1981 y la construcción del proyecto comenzó en agosto de 1988, con las labores de remoción de material estéril. Aproximadamente dos años más tarde, el 3 de noviembre de 1990, se procesó la primera partida de mineral en la planta concentradora y el primer embarque de concentrado de cobre se realizó el 31 de diciembre de ese mismo año. La inauguración oficial de Escondida fue el 14 de marzo de 1991.

El yacimiento Escondida está ubicado en el norte de Chile, en el Desierto de Atacama, a 170 kilómetros al sureste de la ciudad de Antofagasta y a 3.100 metros sobre el nivel del mar. En la Figura 1 se presenta el mapa con la ubicación de Minera Escondida.

## 1. Antecedentes Generales

---



*Figura 1: Plano de ubicación de Minera Escondida Limitada*

La infraestructura consiste en dos minas a rajo abierto, Escondida y Escondida Norte; dos plantas concentradoras, Los Colorados y Laguna Seca, que producen concentrado de cobre; una planta de electro-obtención que produce cátodos a partir de mineral oxidado y sulfurado; dos mineroductos que transportan el concentrado de cobre desde la mina hasta una planta de filtros ubicada en Puerto Coloso ubicado al sur de la ciudad de Antofagasta. En Puerto Coloso, también de propiedad de la compañía, opera una planta desalinizadora cuyo producto -agua de mar desalada de uso industrial- junto con el agua de filtrado, se transporta a la mina a través de un acueducto.

En la Figura 2 se puede observar el proceso de Minera Escondida desde que el mineral es extraído de los yacimientos hasta que los distintos productos son llevados a sus respectivos puertos.

## 1. Antecedentes Generales



*Figura 2: Proceso Minera Escondida Ltda.*

Los propietarios de Minera Escondida son las compañías BHP Billiton (57,5%), Río Tinto (30%), Japan Escondida Corporation (10%) y la Internacional Finance Corporation del Banco Mundial (2,5%).

### 1.1.1 Operaciones MEL

El procesamiento de los sulfuros, que ocurre en las plantas concentradoras, requiere de una serie de reacciones y procesos con la finalidad de beneficiar el mineral, siendo en estos procesos cuando se generan los relaves, los cuales son depositados en el Tranque Laguna Seca (también nombrado como TLS).

A continuación se hace una descripción general de los procesos que ocurren previamente a la generación de los relaves:

- Extracción del mineral, desde los rajes Escondida y Escondida Norte y transporte en camiones hacia destino (botadero, acopio o chancado-molienda).

- Chancado, molienda y molienda secundaria, disminución progresiva del tamaño del mineral, proveniente de los rajos o acopios, desde un tamaño de 3 pulgadas ( $F_{80}$ ) hasta un tamaño de 200 micrones ( $P_{80}$ ) para el envío a flotación.
- Flotación y Remolienda, proceso mediante el cual se obtiene el concentrado de Cu y se genera el relave, mediante la adición de agua y reactivos químicos al mineral, que tienen por objetivo colectar las partículas de cobre y separarlas del material sin valor (relave). Posteriormente el concentrado de Cu es enviado a los espesadores de concentrado y el relave es enviado a los espesadores de relave.
- Espesamiento de concentrado, proceso mediante el cual se extrae parte del contenido de agua al concentrado, para luego enviarlo a estanques de almacenamiento.
- Espesamiento de relaves, proceso mediante el cual se extrae parte del contenido de agua al relave, para luego enviarlo a un cajón distribuidor, desde donde se envían al tranque Laguna Seca. La recuperación de agua es del orden del 55-60% del agua que ingresa.
- Disposición de relaves, almacenamiento de los relaves en el tranque Laguna Seca. La disposición de los relaves está orientada a obtener la máxima recuperación posible de agua de proceso.

## 1.2 Superintendencia de Aguas y Tranque

La Superintendencia de Aguas y Tranque, es la encargada de todos los recursos hídricos de la minera. Se compone de tres áreas, el área de Aguas, el área de Tranque y el área de la Planta Desalinizadora. Cada una de estas áreas está a cargo de un Jefe de Área, los cuales se encuentran bajo el mando de un Superintendente general.

### 1.2.1 Área Aguas

El área de Aguas es la responsable de las fuentes de suministro de agua fresca. Esta agua proviene de cuatro tipos de suministros:

- Monturaqui: fuente de agua subterránea compuesta por un campo de 24 pozos profundos a 80 [km] al noreste de la faena.
- Salar de Punta Negra: ubicado a 35 [km] de la operación, fuente de agua subterránea, compuesta por un campo de 48 pozos al sureste de las instalaciones.
- Hamburgo: fuente de agua subterránea conformada por un campo de pozos ubicados mayoritariamente en el sector sur-este de la mina. Los caudales extraídos en este sector corresponden a su mayoría a aguas alumbradas tipificadas en el Código de Minería y conocidas como aguas del minero. Ésta es una zona que carece de elementos ambientales sensibles por lo que la posibilidad de un eventual impacto ambiental es mínima y su extracción ayuda a estabilizar las paredes del rajo Escondida.
- Desagüe Mina: fuente de agua subterránea constituida por un campo de pozos profundos ubicados en las cercanías de la mina, que contribuye a desaguar y despresurizar el rajo para mantener así la estabilidad de los taludes y recuperar agua fresca para los procesos productivos. Los caudales obtenidos se esta fuente, al igual que la zona de Hamburgo, corresponden a aguas halladas en la operación minera (o aguas del minero).

Desde Monturaqui se envía agua a las dos plantas concentradoras, a lixiviación de sulfuros, a la planta de óxidos, a Escondida Norte y se utiliza también para otros consumos. El Salar de Punta Negra envía agua sólo a las dos plantas concentradoras y Hamburgo y Desagüe Mina envían agua a la piscina 400 (esta piscina también recibe agua recuperada) desde donde se envía el agua hacia la planta concentradora Los Colorados.

De acuerdo al control de los posibles impactos ambientales, en Monturaqui se cuenta con un Plan de Alerta Temprana, destinado a prevenir efectos adversos sobre el acuífero Monturaqui - Negrillar - Tilopozo, donde está ubicado el campo de pozos. El plan permite calcular y evitar que disminuya el nivel de agua en las zonas sensibles hasta el punto en que pueda producir cambios sobre la biodiversidad. Este plan se estableció en el proceso de evaluación ambiental del “Proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de capacidad de tratamiento del mineral sulfurado”, aprobado mediante Resolución Exenta N°001/1997 de la Comisión Regional de Medio Ambiente de la Región de Antofagasta y por la Dirección General de Aguas de esta región.

En el Salar de Punta Negra, se efectúan monitoreos diarios, mensuales y trimestrales en los sistemas lacustres, quebradas orientales y pozos de observación. La extracción histórica de agua desde la cuenca del salar, ha generado la disminución de la presión de afloramiento en los sistemas lacustres Vega – Canal – Laguna (VCL2 y VCL3), esta diferencia ha sido suplida mediante el sistema de riego superficial. Los monitoreos ambientales de detalle, principalmente de flujo superficial, riqueza y abundancia de biodiversidad, indican que estas variables se mantienen según la línea base.

### **1.2.2 Área Planta desalinizadora**

La Planta Desalinizadora tiene como objetivo el desalar agua de mar a través de diferentes procesos, con el fin de producir un agua permeada del tipo industrial para alimentar la planta concentradora Los Colorados de Minera Escondida ubicada en la mina a 3160 metros sobre el nivel del mar.

El proceso consiste inicialmente en retirar la mayor cantidad de sólidos suspendidos posibles mediante dos etapas de Pre-tratamiento y posteriormente en extraer casi la totalidad de las sales disueltas en una etapa de Osmosis Reversa.

Para enviar el agua desde Coloso hasta la minera, se cuenta con un acueducto y cuatro estaciones de bombas que llevan el agua a lo largo de 170 [km], con una capacidad de bombeo de 565 [l/s].



La impulsión del agua permeada, tipo industrial más el efluente de filtros concentrado se lleva a cabo a través de cuatro estaciones de bombeo, una ubicada en Coloso y las otras tres en el camino a Escondida. El agua es enviada de estación a estación por el acueducto de 170 [km].

### 1.2.3 Área Tranque

La principal herramienta de recuperación de agua de proceso es el tranque de relaves Laguna Seca, ubicado en el sector de Laguna Seca ubicada a 15[km] al sureste del yacimiento Escondida. El tranque Laguna Seca inició sus operaciones de depositación en Enero del 2002. El área tiene forma de herradura y cubre aproximadamente 50 [km<sup>2</sup>].

Los relaves generados en MEL provienen de dos plantas concentradoras, Laguna Seca y Los Colorados, y son depositados en el tranque de relaves Laguna Seca, este tranque está constituido por una serie de cajones distribuidores que reciben los relaves (cajones 165, 170, 171 y 172) y los transporta a través de dos ramales, Sur y Norte, de 8 [km] y 20 [km] respectivamente.

Las válvulas de descarga están ubicadas cada 1000 metros, en grupos de cuatro, formando cinco sectores de descarga que permiten escurrir hacia la cota más baja de la represa. Los relaves se depositan desde cada uno de los sectores por tiempos predeterminados y van formando playas que generan la laguna desde donde se recupera el agua hacia el proceso.

El tranque posee una capacidad de almacenamiento de relaves de 2.100 millones de m<sup>3</sup>, y tiene 40 años de utilidad a la actual tasa de depositación (240.000 [tpd]). Al término de la vida útil, el muro debe ser capaz de contener los relaves contenidos en el tranque, por lo que requiere ampliar su capacidad de depósito a 4.500 millones de toneladas. Así, la superficie final del depósito será de 62 [km] con un perímetro de 37 [km]. El punto más bajo está a una elevación de 2.876 msnm y el borde de la taza sube a más de 3.000 metros de elevación.

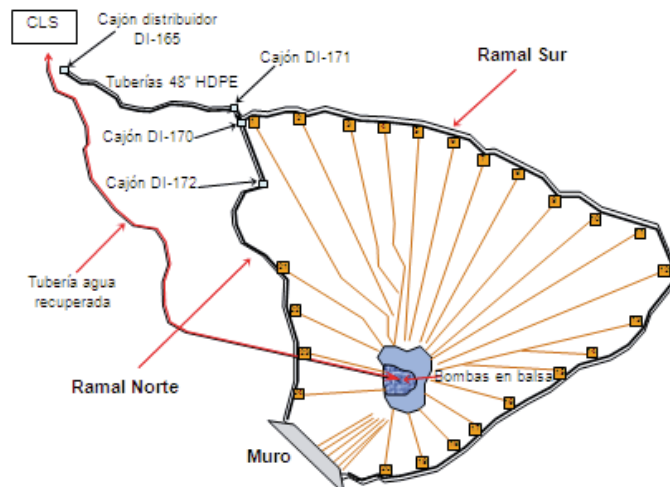
La disposición de los relaves está orientada a obtener la máxima recuperación de agua de proceso, para esto el relave es depositado de forma tal que se forme una laguna de aguas claras que se ubique en la superficie, desde la cual es captada el agua mediante bombas horizontales

## 1. Antecedentes Generales

---

montadas sobre balsas independientes (móviles) que impulsan el agua recuperada hacia una serie de estaciones de bombeo (tipo Booster) que finalmente la impulsan hacia las plantas concentradoras Laguna Seca y Los Colorado según los requerimientos del proceso.

En la Figura 3, se representa un diagrama del Tranque de Relaves Laguna Seca.



*Figura 3: Diagrama Tranque de Relaves Laguna Seca*

Existe una serie de controles en el tranque de relaves para cumplir con la normativa ambiental, los cuales buscan el control de la infiltración de aguas hacia napas subterráneas, el control de la laguna respecto al muro y ver la calidad de las aguas. El decreto regulador más importante es el Decreto N°86/60 regulado por el SERNAGEOMIN.

Para el control de la infiltración se utiliza una “batería de pozos”, la cual se encuentra aguas abajo del muro del depósito de relaves con el fin de interceptar el flujo de infiltraciones generado por la poza de decantación. Esta batería se compone de un total de 7 pozos de bombeo de 42 a 78 [m] de profundidad y 17,5 pulgadas de diámetro alineados en 2 filas paralelas al eje del muro distanciadas aproximadamente 330 metros entre sí. Los caudales individuales de bombeo son de 1,5 a 16 [l/s] dependiendo de la transmisibilidad del entorno de cada pozo. La capacidad total de bombeo del sistema es del orden de 67 [l/s], superior al flujo subterráneo generado por la infiltración del depósito (estimado en 25[l/s]).

Para el control de calidad de las aguas, se dispone de dos tipos de monitoreo:

- Un monitoreo de infiltraciones para detectar cualquier posible cambio en las condiciones del agua subterránea, aguas abajo de la represa de relaves, por medio de un método geofísico electro-magnético no intrusivo (superficial) llamado NANOTEM.
- Un monitoreo en pozos de observación localizados aguas arriba y aguas abajo del tranque de Laguna Seca. En estos pozos de observación se monitorean niveles de agua y parámetros físico-químicos, que complementan la información del sistema NANOTEM. La localización de los pozos de monitoreo así como los parámetros físico-químicos a medirse han sido aprobados por la CONAMA.

A lo que respecta el muro del tranque, se controla la posición de la laguna, la cual deberá ubicarse al menos a 500 metros del muro, ya que este no está diseñado para retener agua. Para que no haya problema en la captación de agua desde la torre, el agua de la laguna debe estar medio metro por sobre el montículo de la zanja de aproximación.

Por otro lado bajo el muro de contención del tranque existe un sistema de drenes con el objetivo de asegurar un talud seco y permitir que el flujo de infiltración bajo el muro aflore en el dren.

### **1.2.4 Suministros de agua**

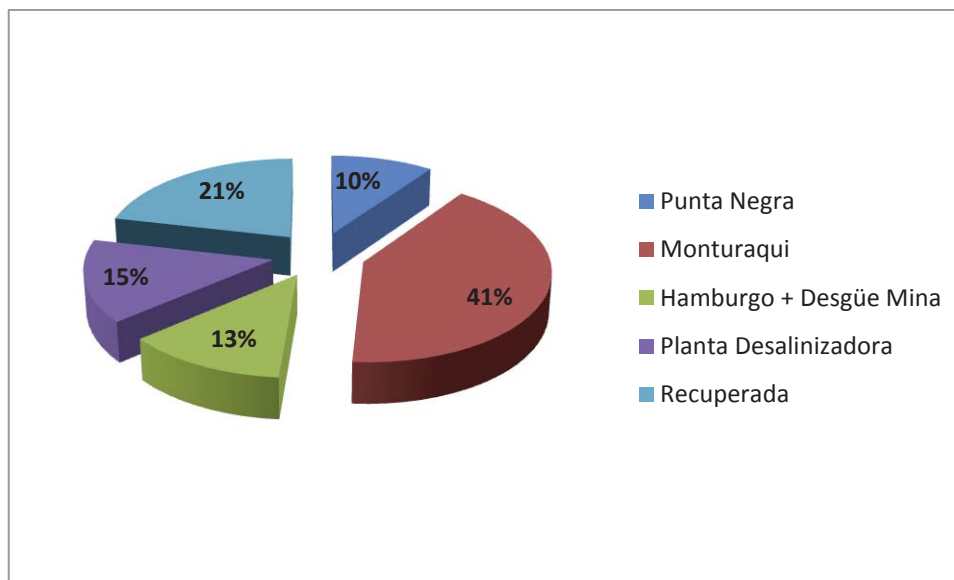
Anteriormente se describieron las distintas áreas que conforman la Superintendencia de aguas, la cual está a cargo de los distintos suministros de agua. Estos se diferencian principalmente en tres tipos de agua; agua fresca, agua recuperada y agua desalinizada.

Se debe considerar que MEL se maneja por año fiscal, el cual considera desde julio hasta junio del año siguiente y se representa por la sigla FY (Fiscal Year), más los dos últimos dígitos del año de término, por ejemplo, el año fiscal desde Julio del 2010 hasta Junio del 2011 se representa FY11.

## 1. Antecedentes Generales

---

A continuación, en el Gráfico 1, se representa la influencia de cada suministro de aguas desde el FY07 hasta el FY11. (Anexo A, página 87)



*Gráfico 1: Suministros de aguas de Minera Escondida Limitada*

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

### 2.1 Descripción del Problema

Las operaciones de MEL se encuentran ubicadas en el desierto más árido del planeta, el desierto de Atacama, bajo este contexto el uso adecuado y eficiente del agua es fundamental dentro del ciclo de vida de las operaciones, considerando que se trata de un recurso esencial para el proceso minero. Para obtener este recurso, MEL cuenta con diferentes suministros de agua que se agrupan en tres tipos: agua fresca, agua desalinizada y agua recuperada.

Frente al elevado costo del agua desalinizada y las normativas ambientales existentes que limitan la extracción de agua fresca, el agua recuperada toma un papel protagónico, siendo la principal fuente de extracción de esta agua, el Tranque de Relaves Laguna Seca. Actualmente representa aproximadamente un 30% del consumo diario.

Un buen comportamiento de las proyecciones de agua recuperada permite un mejor manejo de los suministros de aguas. Actualmente, la empresa asesora Arcadis, mediante el desarrollo de un conjunto de ecuaciones, llamado “Modelo de balance de aguas del Tranque de relaves Laguna Seca”, que representa el comportamiento hídrico del tranque, entrega las proyecciones de agua recuperada, mensuales y anuales, sin embargo Minera Escondida Limitada no cuenta con una validación de los datos entregados por el modelo que muestre como se ha comportado a lo largo del tiempo este modelo respecto a la realidad.

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 Objetivo General**

Estudiar impacto económico de la recuperación de agua desde el Tranque de relaves Laguna Seca y analizar el comportamiento de las proyecciones de agua recuperada entregadas por el conjunto de ecuaciones que caracterizan el comportamiento del Tranque de relaves respecto a la realidad.

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

- Encontrar relación de costo versus fuentes de aguas disponibles.
- Estudiar comportamiento del Tranque de relaves Laguna Seca.
- Analizar fiabilidad del conjunto de ecuaciones que se utilizan para el cálculo de las proyecciones de agua recuperada desde el Tranque Laguna Seca.
- Encontrar puntos de mejoras en el conjunto de ecuaciones y proponer soluciones.

## **2.3 Metodología**

Estudiar el impacto económico que tienen la utilización de las distintas fuentes de aguas disponibles, tanto agua de pozos, agua desalinizada y agua recuperada del tranque de relaves Laguna Seca, considerando la disponibilidad de cada una de las fuentes. Encontrar curva que relacione el porcentaje de agua recuperada con la variación porcentual en el costo de consumo de agua total.

Estudiar el comportamiento del tranque de relaves y sus variables implicadas para conocer el impacto en la recuperación de agua. Estudiar conjunto de ecuaciones que caracterizan el

## 2. Descripción del Problema y Objetivos

---

comportamiento del tranque y reconocer las variables manipulables e influyentes en la recuperación de agua.

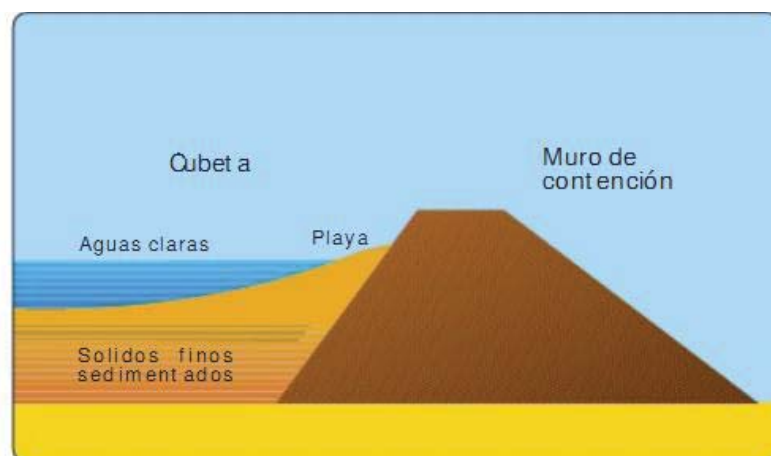
Analizar los resultados históricos obtenidos desde el conjunto de ecuaciones y comparar con datos reales para encontrar la fiabilidad de las proyecciones que entrega actualmente el modelo de comportamiento del tranque de relaves.

Proponer puntos de análisis que apunten a mejorar la calidad de las proyecciones y finalmente analizar los costos asociados a los problemas enfrentados en el análisis de las proyecciones.

### 3. ASPECTO TEÓRICOS DE LOS TRANQUES DE RELAVES

Un tranque de relaves, es una obra que se construye para contener en forma segura los relaves provenientes de los procesos productivos mineros, principalmente del proceso de flotación. Los relaves son los residuos de los procesos mineros y están compuestos por material sólido y agua con reactivos.

Un tranque de relaves está formado por un muro de contención y una cubeta. En la cubeta los sólidos finos sedimentan formando en la superficie una laguna de aguas claras. En la Figura 4 se presenta un esquema de las partes de un tranque de relaves.



*Figura 4: Esquema de las partes de un tranque de relaves*



Antes de construir un tranque de relaves se deben considerar los siguientes puntos; la selección de un sitio adecuado, las condiciones climáticas del lugar, la elección de un método seguro para depositar los relaves y la aprobación por parte del SERNAGEOMIN. Estos pasos son importantes de considerar debido a los riesgos de operación que un tranque de relaves representa, los cuales deben ser minimizados para proteger la salud de las personas y prevenir daños a bienes físicos y al medio ambiente, dentro de los riesgos se tiene; la falla del muro del tranque con vaciamiento de relaves, arrastre de relaves por efecto de lluvias intensas, filtración de aguas del relave al entorno e infiltración bajo el tranque y levantamiento y arrastre de material fino por acción del viento. También es importante considerar que en algunos casos el agua de los relaves puede disolver minerales solubles y contener reactivos de flotación, mercurio y otros productos, por lo que podría ser nocivo que llegue a contactar suelos y recursos de agua utilizados por las personas.

#### **3.1 Construcción y Operación del Tranque**

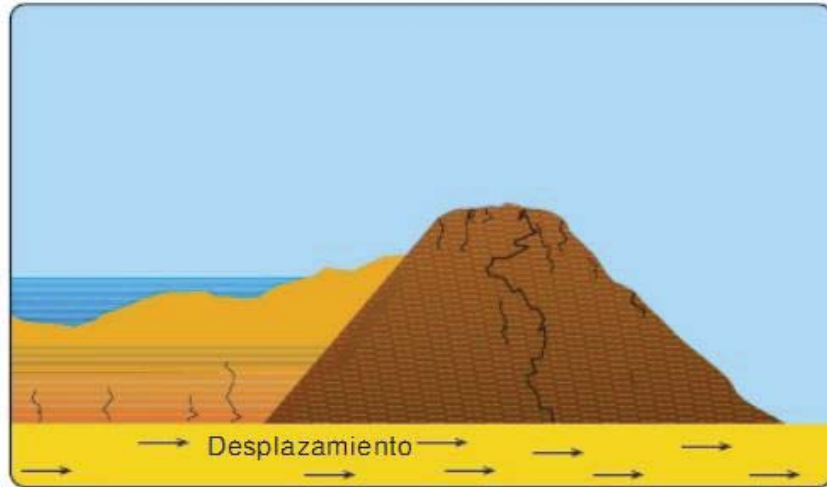
Como se mencionó anteriormente, uno de los aspectos importantes a considerar previo a la construcción del tranque es la elección del sitio adecuado para la construcción de este. De acuerdo a las condiciones a presentar el sitio, se destacan las siguientes:

- Las características topográficas deben permitir construir el muro de contención con una menor cantidad de material, quedando los relaves soportados principalmente por muros naturales.
- El suelo debe ser resistente y con buenas características de impermeabilidad.
- No deben haber viviendas o centros poblados aguas abajo del sitio.
- El sitio debe estar alejado de caminos u otras obras públicas, cursos de agua permanentes o temporales, fuentes de aguas subterráneas o sitios con valor histórico arqueológico.

### 3. Aspectos Teóricos de los Tranques de Relaves

---

En caso de que el suelo no sea resistente, este podría deformarse y desplazarse a medida que se va acumulando el relave, con el riesgo de generar un colapso del tranque como se observa en la Figura 5.



*Figura 5: Riesgos de un suelo no resistente.*

#### 3.1.1 Muro del tranque

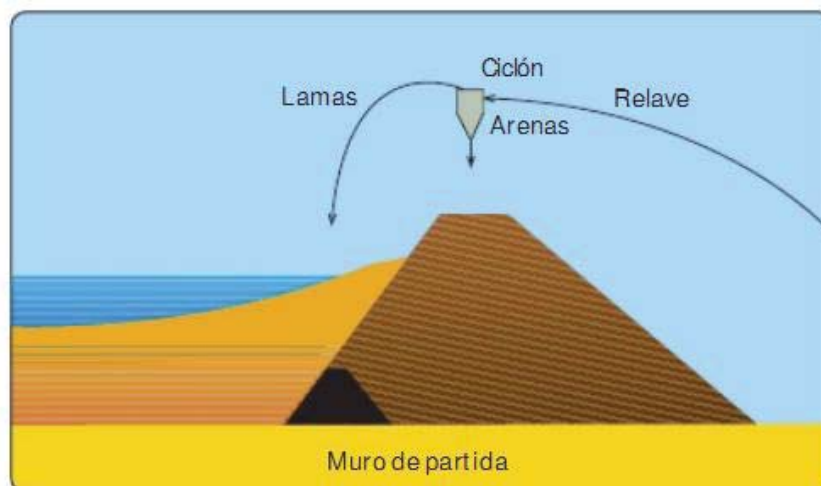
La construcción del muro del tranque de relaves consiste principalmente en tres pasos:

- Preparación de la zona del muro con un sistema de drenaje.
- Construcción de un pequeño muro inicial con material de empréstito.
- Levantamiento del muro depositando la fracción gruesa del relave sobre el muro inicial.

Para la separación de la fracción gruesa del relave se utilizan hidrociclones, los que permiten operar el tranque de manera más eficiente y segura. La fracción gruesa se deposita en el muro, mientras que la fracción fina o lamas se deposita en la cubeta del tranque como se observa en la Figura 6.

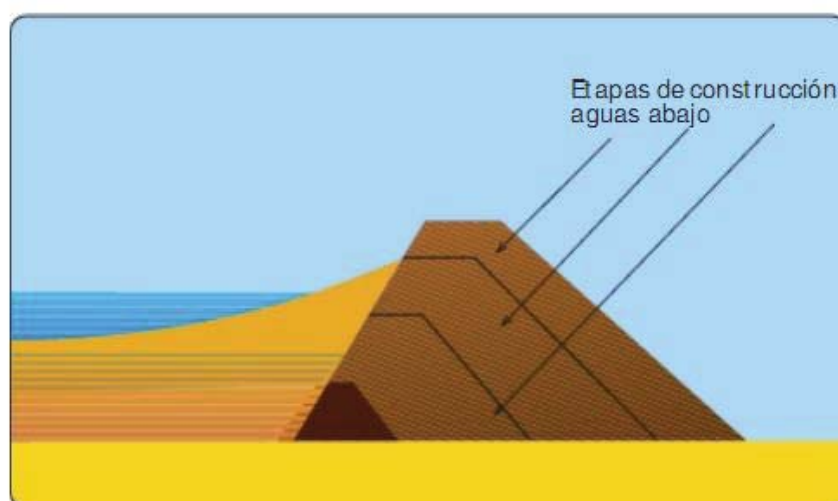
### 3. Aspectos Teóricos de los Tranques de Relaves

---



*Figura 6: Cicloneo en el muro del tranque*

Respecto al método de construcción, el que ofrece una contención más segura es el método llamado “aguas abajo”, donde la operación consiste en depositar las arenas de manera que el coronamiento del muro se mueva hacia afuera a medida que crece el tranque como se ilustra en la Figura 7, por el contrario, la fracción fina se deposita aguas arriba. La mayor seguridad de este método, se refleja en que la obra es más estable frente a movimientos externos como temblores o terremotos.



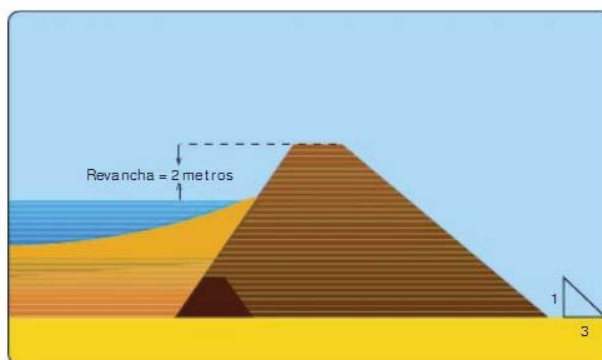
*Figura 7: Método de construcción “Aguas abajo”*

Debido al drenaje natural y a la compactación, la construcción con las arenas cicloneadas se va apoyando sobre arenas depositadas previamente que tienen menor contenido de agua, por lo que el muro es más resistente.

#### 3.1.2 Operación del tranque

Para una buena operación del tranque se deben considerar los siguientes puntos:

- Controlar la cantidad y calidad de las arenas para mantener una altura y ángulo de talud que hagan estable el muro. Una buena estabilidad se alcanza con un talud 3:1.
- En el interior del depósito se debe formar una playa de arenas lo más extensa posible, manteniendo la laguna de aguas claras alejada del muro.
- El desnivel entre el coronamiento del muro y la altura de la laguna de aguas claras, llamado revancha, debe tener una altura mínima de 2 metros, ver Figura 8.
- Se debe hacer lo posible para recuperar agua clara desde la laguna y los drenes ubicados bajo el muro, recirculándola a la planta de beneficio.
- Se debe realizar un control rutinario para detectar posibles deformaciones o asentamientos, filtraciones anormales en el muro, presencia de grietas, etc.
- Se debe planificar con tiempo las acciones para un cierre seguro del tranque.

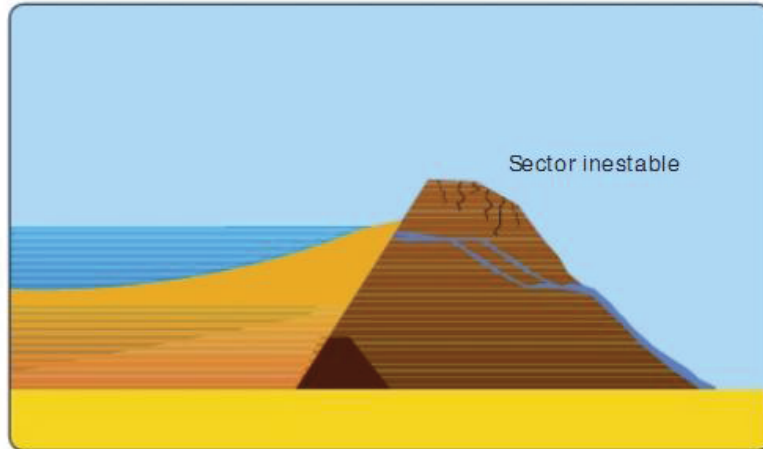


*Figura 8: Revancha del muro*

### 3. Aspectos Teóricos de los Tranques de Relaves

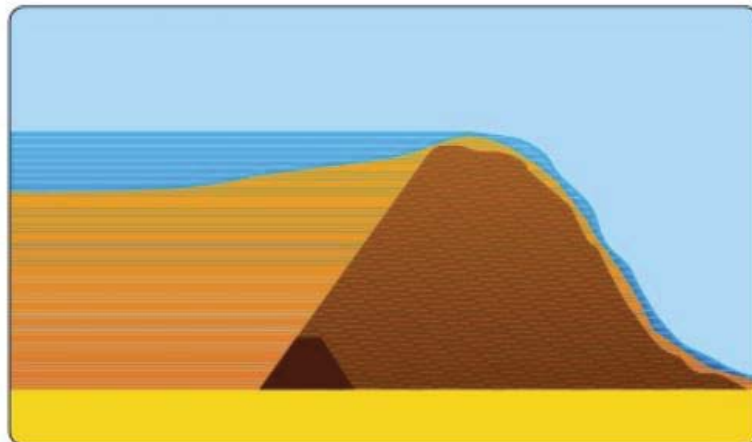
---

Si la laguna se mantiene cerca del muro, el nivel del agua en el muro se eleva creándose condiciones de inestabilidad y riesgo de colapso. Las arenas del muro se pueden saturar y generar un proceso localizado de filtración que se puede extender hasta una falla generalizada del tranque como lo ilustra la Figura 9.



*Figura 9: Riesgo de la laguna cerca del muro*

Si no se controla la revancha, en un caso extremo, el agua de la laguna podría rebasar el muro, como se muestra en la Figura 10, erosionándolo y arrastrando arenas y lamas fuera del depósito, con lo que se puede generar un colapso de la obra.



*Figura 10: Rebase de la laguna por no control de la revancha*

#### **3.1.3 Recuperación de agua**

El hecho de recuperar agua clara desde un tranque de relaves y recircularla a los procesos productivos tiene un gran importancia, debido a que se aprovecha mejor el recurso hídrico, especialmente en zonas donde el agua es escasa. Es importante evitar la descarga de agua del proceso al ambiente e impedir el riesgo de contaminación de suelos y aguas del entorno.

Existen diversas formas de recuperación de agua clara desde el tranque, como:

- La recuperación del agua de la laguna mediante torres de captación, bombas superficiales o por simple sifoneo.
- La recuperación del agua que se filtra por el muro a través de drenes y la canalización del flujo.
- La recuperación del agua del muro, la cual se puede devolver al tranque o se puede juntar en un estanque común con el agua recuperada de la laguna para su recirculación a los procesos.

#### **3.1.4 Cierre de tranques**

La paralización temporal de un tranque de relave, requiere el aviso al SERNAGEOMIN y a la vez se debe llevar a cabo un plan de cuidado y mantención que permita reiniciar la actividad sin problemas.

Si la paralización es permanente, se requiere ejecutar el cierre del tranque, en el cual el SERNAGEOMIN exige una serie de conceptos técnicos como mínimo a realizar:

- Desmantelar instalaciones (ductos, ciclones, muelles)
- Manejo o secado de laguna de aguas claras

- Cercar torres colectoras
- Estabilización de taludes (reforzamiento)
- Compactación berma coronamiento
- Mantenimiento de canales perimetrales
- Sistema de evacuación de aguas lluvia (sifones, vertederos)
- Recubrimiento de cubeta y taludes (suelo natural, suelo granular, vegetar)
- Aplicar medidas de reparación
- Instalar señalizaciones y bloquear accesos

#### **3.1.5 Normas de construcción y operación**

En la construcción y operación de los tranques de relaves, las normas más importantes están contenidas en el Decreto N°86/70, donde se regula la forma de diseñar, construir y operar un tranque de relaves. El organismo regulador es el SERNAGEOMIN.

### 4. CONSUMO DE AGUA

Minera Escondida Limitada cuenta con diferentes suministros de agua para el consumo de esta, que se agrupan en tres tipos: agua fresca, agua desalinizada y agua recuperada. Los suministros de agua fresca son aquellas fuentes de agua subterránea compuestas por campos de pozos. Las fuentes de agua subterránea son cuatro: Monturaqui, Punta Negra, Hamburgo y Desagüe Mina. Los pozos actuales tienen una disponibilidad limitada, debido a los distintos códigos medio ambientales que permiten una extracción sin afectar la biodiversidad. En tanto, el agua desalinizada, es una fuente de agua segura, sin embargo al encontrarse la planta desalinizadora en la ciudad de Antofagasta, (ubicada a 170 km al sureste de la ciudad de Antofagasta), hace que el bombeo del agua hasta la mina sea bastante costoso. Debido a las limitantes de estas fuentes de agua, el agua recuperada toma un rol principal, entre las cuales se considera el agua recirculada al proceso mediante los espesadores de relaves en ambas plantas concentradoras y el agua recupera desde el tranque de relaves Laguna Seca.

La principal fuente de recuperación de agua de proceso es el tranque de relaves Laguna Seca, ubicado al sur de la concentradora Laguna Seca. Los relaves de las dos concentradoras (Los Colorados y Laguna Seca) son depositados en esta cuenca cerrada, donde por el proceso de depositación del material sólido se genera un volumen de agua clara en la superficie. Esta agua es recuperada mediante bombas y es retornada a una piscina desde donde se distribuye a las plantas según los requerimientos del proceso.

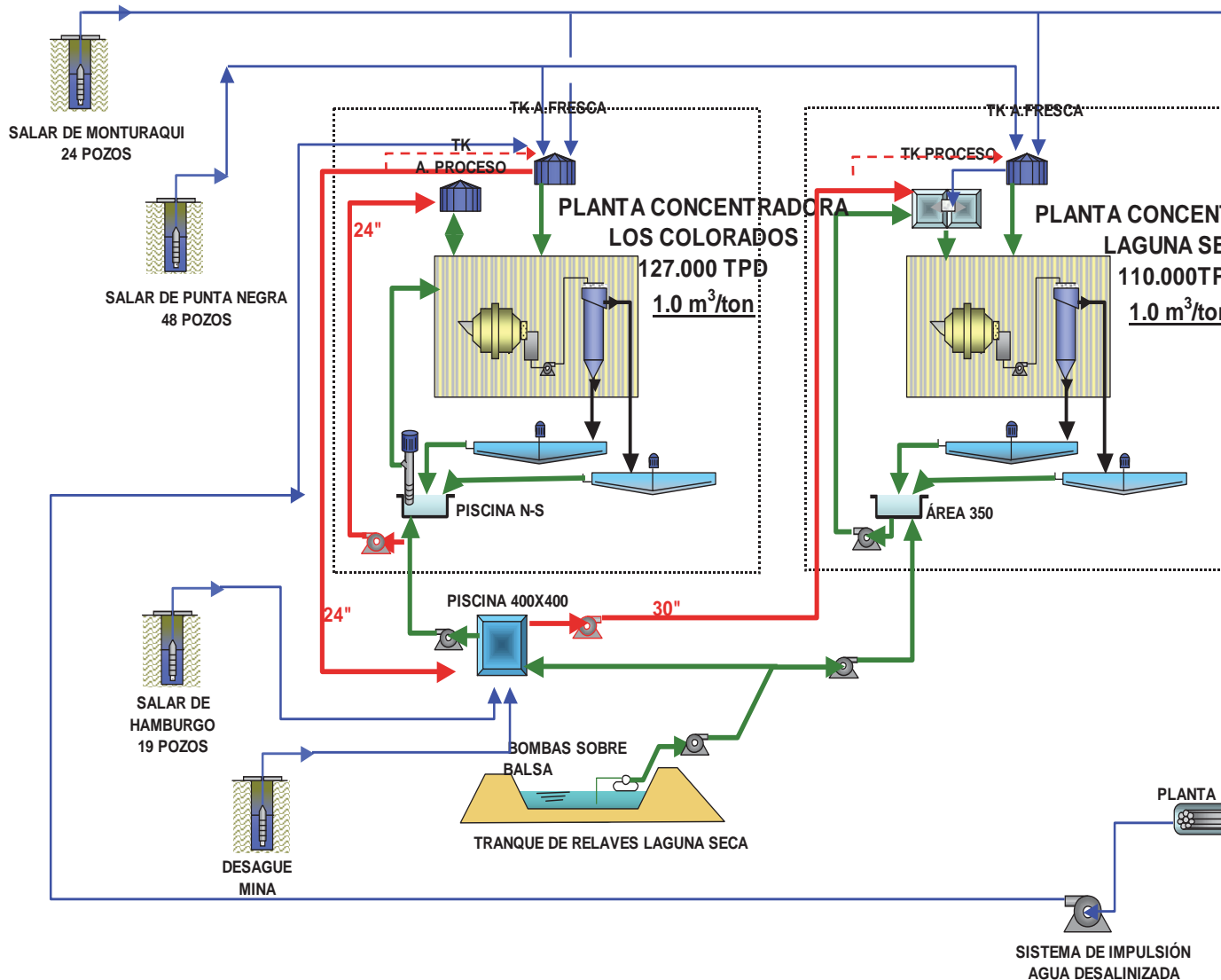


Es importante conocer la repercusión económica de estas fuentes de agua en el proceso, por lo que a continuación se analizara el costo de consumo de agua total, el efecto en el costo de no contar con una de las fuentes de agua y el efecto en el costo de consumo total por la variación porcentual del agua recuperada.

### **4.1 Análisis del Consumo de Agua**

En la Figura 11, se representa el diagrama global de los suministros de las distintas fuentes de agua de los procesos que se llevan a cabo en la minera.

## 4. Consumo de Agua



*Figura 11: Diagrama de distribución de aguas*

En la figura, se observa que el agua suministrada a la concentradora Los Colorados proviene de las tres fuentes de aguas, agua fresca, agua desalinizada y agua recuperada, por otro lado el agua suministrada a la concentradora Laguna Seca es agua fresca y recuperada. También se observan consumos de agua en el proceso de lixiviación de sulfuros, en la planta de óxidos, en el rajo Escondida norte y en otros consumos, los cuales se suministran únicamente de agua fresca.

## 4. Consumo de Agua

---

Considerando datos históricos, del balance general de aguas y del suministro de aguas, se obtiene que en promedio el agua total alimentada a las plantas concentradoras es 63% agua fresca, 7% agua desalinizada y 30% agua recuperada. (Anexo B, página 88)

El flujo de agua de alimentación requerido para las plantas concentradoras, es de 1[m<sup>3</sup>/ton de mineral alimentado]. El tonelaje diario total entre las plantas concentradoras es de aproximadamente 240 [ktpd], donde alrededor de 127[ktpd] se procesan diariamente en Los Colorados, lo que representa un 54% del tonelaje total y en Laguna Seca se procesan 110 [ktpd], lo que representa el 46% restante.

El costo de cada uno de los suministros de agua se presenta en la Tabla 1:

*Tabla 1: Costo de los distintos suministros de agua*

	Agua Recuperada	Agua Pozos	Agua Desalinizada
Costo Agua* [US\$/m <sup>3</sup> ]	0,44	0,61	4,1

*\*Costos entregados por la Superintendencia de Aguas y Tranque de MEL.*

Observando los distintos costos de las aguas, se plasma la importancia de la utilización del agua recuperada en el proceso ya que es la de menor costo y llega a tener un costo nueve veces menor que el agua desalinizada.

A continuación, se analiza el costo de consumo de agua para la producción diaria (240 ktpd) y el costo implicado al tener variaciones en la recuperación de agua.

### 4.1.1 Costo consumo de agua alimentada promedio en el día

Este costo representa el consumo diario de agua considerando ambas plantas concentradoras. De lo anterior se resume que:

Tonelaje diario procesado en las concentradoras: 240.000 [tpd]

Flujo de agua alimentado a concentradoras: 1 [m<sup>3</sup>/ton]

#### 4. Consumo de Agua

---

Agua Fresca: 63% del agua total

Agua desalinizada: 7% del agua total

Agua Recuperada: 30% del agua total

Según los datos,

$$\text{Costo Agua} = \text{Costo Agua Fresca} + \text{Costo Agua Desalinizada} + \text{Costo Agua Recuperada}$$

$$\text{Costo Agua} = 0,63 * 1 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * 0,61 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} + 0,07 * 1 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * 4,1 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} + 0,3 * 1 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * 0,44 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Costo Agua} = 0,8 \frac{\text{US\$}}{\text{ton}}$$

Por consiguiente, el costo de consumo de agua para un tonelaje diario de alimentación de 240.000 [ton] es de:

$$\text{Costo consumo agua} = 240.000 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * 0,8 \frac{\text{US\$}}{\text{ton}} = 192.000 \frac{\text{US\$}}{\text{día}}$$

#### 4.1.2 Costo consumo de agua alimentada promedio en el día no utilizando agua desalinizada

A continuación, se calcula el costo que se tendría al no tener agua desalinizada disponible y esta fuera reemplazada por agua fresca.

$$\text{Costo Agua} = \text{Costo Agua Fresca} + \text{Costo Agua Recuperada}$$

$$\text{Costo Agua} = 0,7 * \left[ 1 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * 0,61 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] + 0,3 \left[ 1 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} * 0,44 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = 0,6 \frac{\text{US\$}}{\text{ton}}$$

$$\text{Costo consumo agua} = 240.000 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * 0,6 \frac{\text{US\$}}{\text{ton}} = 144.000 \frac{\text{US\$}}{\text{día}}$$

#### 4. Consumo de Agua

---

De no ocupar agua desalinizada, el costo de agua disminuye a 0,6 [US\$/ton], lo que para 240.000 [tpd] tiene un costo de US\$144.000, es decir US\$48.000 menos que en una situación normal. Pese a esta disminución en el costo, se debe tener en cuenta que el suministro de agua fresca disponible se ve limitado por normativas ambientales.

#### 4.1.3 Costo agua alimentada promedio en el día no utilizando agua de pozos

Como el suministro de agua fresca disponibles se ve limitado por normativas ambientales, se estudia el costo de no tener esta fuente de agua disponible y tener que reemplazarla por agua desalinizada.

$$\text{Costo Agua} = \text{Costo Agua Desalinizada} + \text{Costo Agua Recuperada}$$

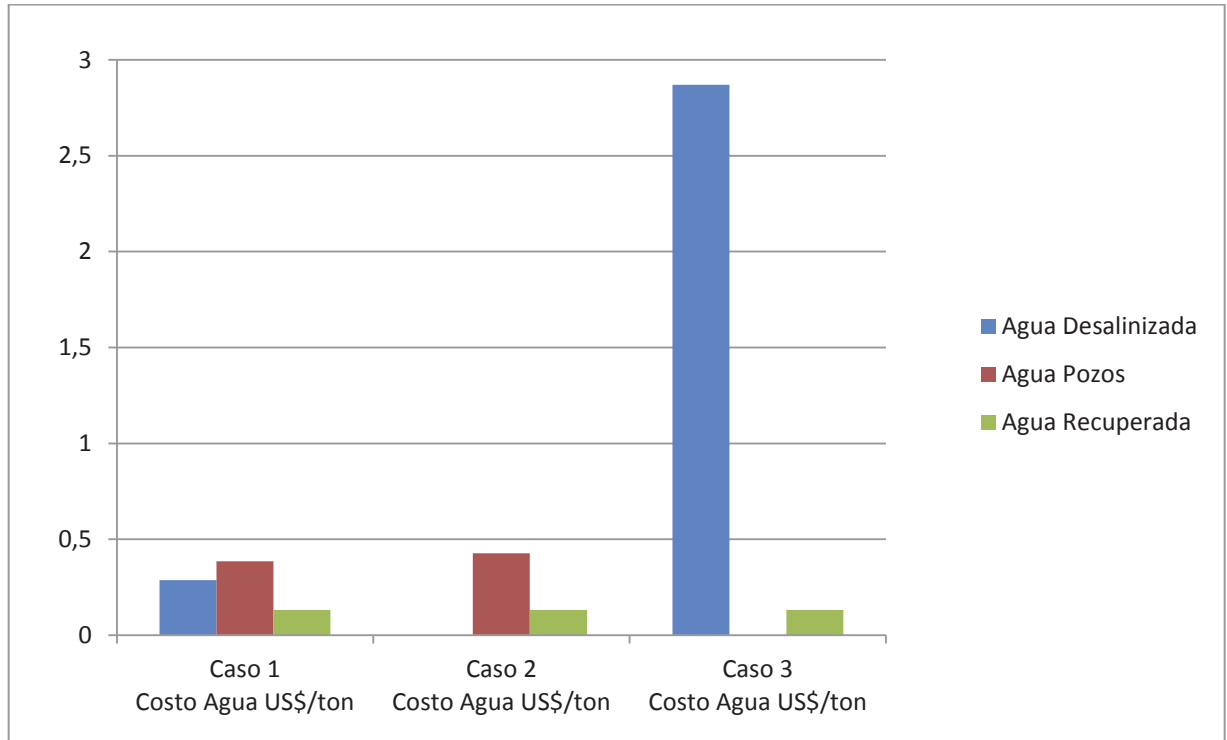
$$\text{Costo Agua} = 0,7 * \left[ 1 \frac{m^3}{ton} * 4,1 \frac{US\$}{m^3} \right] + 0,3 \left[ 1 \frac{m^3}{ton} * 0,44 \frac{US\$}{m^3} \right] = 3,0 \frac{US\$}{ton}$$

$$\text{Costo consumo agua} = 240.000 \frac{ton}{día} * 3,0 \frac{US\$}{ton} = 720.000 \frac{US\$}{día}$$

De no contar con el agua proveniente desde los pozos, y suplir esa necesidad con el agua desalinizada, los costos de consumo de agua suben a 3,0 [US\$/ton] lo que implica un costo diario de US\$720.000 por las toneladas diarias procesadas, es decir, US\$528.000 más que la situación normal.

Los tres casos anteriores, se presentan en el Gráfico 2, en el cual se observa que el caso de mayor costo se produce al reemplazar el agua fresca por agua desalinizada, y a la vez el caso de menor costo se produce al no utilizar agua desalinizada. Esto se debe al alto costo del agua desalinizada (4,1 US\$/ton), debido al alto costo en el transporte de esta agua desde la planta desalinizadora ubicada a 170 [km] de la mina.

## 4. Consumo de Agua



*Gráfico 2: Costo de agua alimentada a concentradoras*

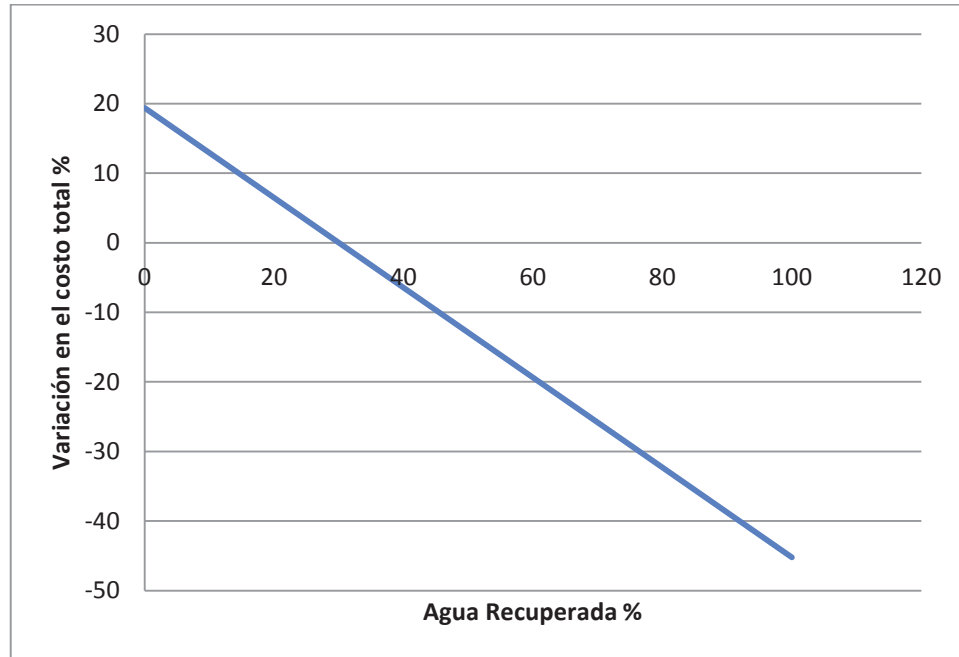
Debido a esta diferencia es necesario disminuir lo máximo posible el consumo de agua desalinizada, una alternativa para suplir esta fuente es el agua recuperada, por lo que es importante estudiar formas de aumentar la disponibilidad de esta fuente.

### 4.1.4 Efecto en el costo por la variación en el agua recuperada

El porcentaje de agua recuperada utilizada repercute directamente en el costo de consumo de agua, considerando la relación actual entre el agua fresca y el agua desalinizada, 90% y 10% respectivamente, pero considerando una variación en el agua recuperada desde el tranque de relaves Laguna Seca, se obtiene una relación entre el costo del consumo de agua total respecto a la variación porcentual del agua recuperada utilizada, la cual se refleja en el Gráfico 3. (Anexo C, página 89)

#### 4. Consumo de Agua

---



*Gráfico 3: Variación del costo del consumo de agua con variación de agua recuperada*

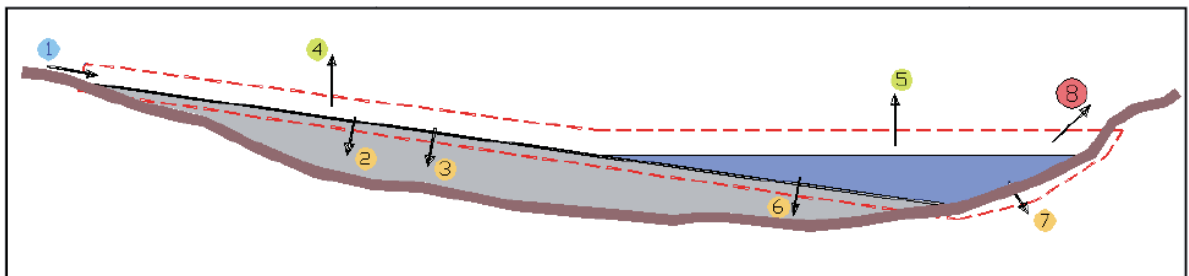
Según el gráfico, se concluye que el costo de consumo de agua es inversamente proporcional a la recuperación de agua, por lo que aumentando la recuperación es posible disminuir costos.

Se debe considerar que es imposible la recuperación total de agua proveniente del relave, sin embargo se debe considerar la forma de buscar la operación óptima del tranque que entregue una mayor recuperación. Para esto es necesario realizar el análisis de las variables que influyen directamente en la recuperación de agua desde el tranque de relaves, para así atacar las variables manejables influyentes en las pérdidas que se producen en el tranque y a la vez que limitan la recuperación de agua.

### 5. MODELO DEL BALANCE DE AGUAS DEL TRANQUE LAGUNA SECA

La Superintendencia de Aguas y Tranque en conjunto con la empresa asesora Arcadis, han desarrollado un conjunto de ecuaciones con el objetivo de representar el comportamiento hídrico del tranque de relaves Laguna Seca, el cual es nombrado como “Modelo del balance de aguas del tranque de relaves Laguna Seca”, en adelante llamado “modelo”. El desarrollo de este modelo es presentado a continuación, y se hace hincapié que se conserva el planteamiento original propuesto por Arcadis. Las ecuaciones presentadas son las que actualmente se utilizan en el cálculo de las proyecciones de agua recuperada y con las que se generaron las proyecciones históricas que se utilizarán posteriormente para el análisis de datos.

Los flujos considerados para el balance se muestran en la Figura 12.



*Figura 12: Balance de Agua Superficial*



## 5. Modelo del Balance de Aguas del Tranque de Relaves Laguna Seca

N°	Identificación flujos Figura 12
1	Agua que ingresa con el relave
2	Agua retenida en el relave depositado
3	Pérdida de agua por resaturación de playas secas
4	Evaporación desde la superficie de las playas activas
5	Evaporación desde la superficie de la laguna
6	Infiltración desde la laguna hacia el relave
7	Infiltración desde la laguna hacia la ladera (terreno natural)
8	Recuperación de agua

El balance del modelo se desprende de la siguiente ecuación general (1.1):

$$\text{Agua Entrada} = \text{Pérdidas} + \text{Agua Recuperada} + \frac{dV}{dt} \quad (1.1)$$

Donde el agua de entrada es el agua contenida en los relaves que ingresan al tranque, las pérdidas es el valor de la suma de las pérdidas individuales que tienen lugar en el tranque, en este caso se consideran las pérdidas por retención, las pérdidas por evaporación, las pérdidas por infiltración y las pérdidas por resaturación. El  $dV/dt$  es la variación de volumen de laguna en el tiempo, tanto para el caso real como para la resolución del modelo no se considera cambio en el volumen de la laguna. Finalmente el agua recuperada, es el flujo de agua que se recupera desde el tranque de relaves y la variable de interés.

La resolución del modelo se explica mediante la definición de dos fases, Fase 1 y Fase 2. La primera fase se encarga de calcular las pérdidas con datos históricos y las calibra, y la segunda fase se enfoca en la resolución, es decir, la obtención de la proyección.

- **Fase 1:** se trabaja desde el balance general, desde el cual se despejan las pérdidas, obteniendo la ecuación (1.2), y los otros flujos se reemplazan por valores históricos conocidos, ya que se tienen datos reales históricos del agua de entrada, del agua recuperada y de la variación de volumen en el tiempo.

$$Pérdidas = Agua Entrada - Agua Recuperada - \frac{dV}{dt} \quad (1.2)$$

Estas pérdidas obtenidas son las totales, y representan la sumatoria de las pérdidas por retención, evaporación, infiltración y retención. Cada una de estas pérdidas individuales posee una ecuación particular modelada también por Arcadis. Mediante el cálculo de la pérdida total se calibran los coeficientes de cada una de estas pérdidas. A estas pérdidas totales con sus coeficientes calibrados se les llamará *Pérdidas\** para diferenciarlas.

- **Fase 2:** luego de la primera fase y calibrada los coeficientes de las ecuaciones de las pérdidas se obtiene el balance final con el cual se obtienen las proyecciones de agua recuperada. A la vez, se considera que no hay variación de volumen de la laguna y que este es igual a 1,5 [Mm<sup>3</sup>], por lo que  $dV/dt$  se considera igual a cero. Obteniendo la siguiente ecuación de resolución:

$$Agua Recuperada = *Pérdidas - Agua Entrada \quad (1.3)$$

Para la resolución del modelo, se debe tener en cuenta que Arcadis cuenta con un software de simulación del crecimiento del tranque, conocido como “Modelo de Crecimiento”, el cual mediante imágenes 3D caracteriza el crecimiento y calcula variables de gran utilidad para el modelo. Este software es de propiedad de Arcadis, quienes resguardan la información con respecto a él.

## 5.1 Ingreso de Agua

Para el cálculo se considera la concentración de los relaves que ingresan al depósito. El agua contenida en los relaves es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$A = \left[ \frac{P}{\gamma_w} \times \left( \frac{1 - C_p}{C_p} \right) \right] \times N_{día} \quad (1.4)$$

Donde:

$A$ : Agua contenida en los relaves [ $m^3$ / mes]

$P$ : Producción de relaves [tpd]

$C_p$ : Concentración en peso del relave (%)

$N_{día}$ : Número de días del mes [días]

$\gamma_w$ : Densidad del agua [ $t/m^3$ ]

El agua por escorrentía y precipitaciones se considera despreciable, debido a que no es una zona lluviosa y anualmente se tiene un promedio que tiende a 0[mm] caídos de agua. El agua que ingresa con los relaves es el único flujo de agua de entrada.

La producción de relaves es entregado desde de las plantas concentradoras mediante sus proyecciones. Esta es producción es variable, pero se mueve en un rango cercano a las 200.000 toneladas por día.

La concentración en peso del relave es medida manualmente, la precisión de esta va a depender de la manipulación de cada operador. Cualquier imprecisión afecta directamente al agua de entrada. Actualmente no se cuenta con un plan de medición diaria.

## 5.2 Salidas de Aguas y pérdidas

Dentro de estos flujos se considera el agua de salida, que es el agua recuperada y el agua que se pierde mediante evaporación, infiltración, retención y resaturación.

### 5.2.1 Pérdidas por retención de agua en el relave depositado

Depende de la cantidad de relaves depositados y de la humedad de saturación. Para este efecto, se considera que el relave, en la capa superior, donde escurre el relave, se encuentra saturado. La pérdida por este concepto se expresa de la siguiente manera:

$$A_{RET} = \left[ \frac{P}{\gamma_w} \times w_{SAT} \right] \times N_{día} \quad (1.5)$$

$$w_{sat} = \frac{e_0}{G} \quad (1.6)$$

Donde:

$P$ : Producción de relaves [tpd]

$N_{día}$ : Número de días del mes [días]

$w_{SAT}$ : Humedad de saturación

$\gamma_w$ : Densidad del agua [ $t/m^3$ ]

$e_0$ : Índice de vacío inicial

$G$ : Peso específico relativo de sólido

El valor de  $e_0$ , representa el volumen de vacío por el volumen de sólidos, mediante juicio experto en base a información bibliográfica (según información bibliografía el valor de  $e_0$  fluctúa entre 1,0 y 1,25) y a calibraciones anteriores, en la modelación del balance de aguas se

utiliza un valor de 1,1. El valor utilizado de G es de 2,7, valor obtenido mediante ensayos reológicos realizados años atrás en la compañía.

### 5.2.2 Pérdidas por evaporación de agua desde la playa activa

Esta pérdida contabiliza la evaporación producida en la playa activa, es decir, en la superficie donde se está descargando relave. Esta pérdida se representa en la siguiente ecuación.

$$A_{PLAYA} = T_{EE} \times \Omega_{PLAYA} \quad (1.7)$$

Donde:

$T_{EE}$ : Tasa de evaporación de embalse [mm/día]

$\Omega_{PLAYA}$ : Superficie de la playa activa [m<sup>2</sup>]

La tasa de evaporación es entregada por el área de medio ambiente. Respecto a la superficie de la playa de una sola descarga, Arcadis desarrolló las siguientes ecuaciones para su cálculo:

$$\Omega_{PLAYA} = b_{PLAYA} \times L_{K PLAYA} \quad (1.8)$$

$$b_{PLAYA} = N \times \Psi \times \left( \frac{Q/N}{\sqrt{i}} \right)^{3/8} \quad (1.9)$$

Donde:

$\Omega_{PLAYA}$ : Superficie de la playa activa de relaves en directo [m<sup>2</sup>]

$b_{PLAYA}$ : Ancho esperado playa húmeda [m]

$L_K$ : Distancia entre la laguna y el punto de descarga k [m]

$N$ : Número de descargas simultáneas

$Q$ : Caudal de pulpa [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$i$ : Pendiente de depositación relaves

$\Psi$ : Coeficiente de proporcionalidad (150-175)

La expresión de la ecuación (1.9), para el cálculo del ancho esperado de la playa húmeda fue desarrollada por Arcadis asimilando el recorrido del relave al comportamiento hidráulico de un canal de gran ancho y reducida profundidad mediante la aplicación de la ecuación de Manning.

El coeficiente de proporcionalidad fue adoptado desde otros proyectos, Pampa Austral y Pampa Pabellón, el cual fue estimado mediante interpretación de imágenes aéreas, el valor considerado para el modelo es de 150.

$L_K$  se calcula con la cota de descarga ( $Z_{DESC}$ ), la cota de la laguna ( $Z_{LAG}$ ) y la pendiente de depositación, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$L_K = \frac{Z_{DESC} - Z_{LAG}}{i} \quad (1.10)$$

Donde:

$Z_{LAG}$ : Cota de la laguna [m]

$Z_{DESC}$ : Cota de descarga [m]

Ambas cotas son obtenidas del modelo de crecimiento y las pendientes, según el sector, fueron obtenidas desde un estudio topográfico cuyos valores son de 0.4 para el sector 1, 2 y 3, de 0.45 para el sector 4 y de 0.5 para el sector 5.

Como se cuenta con varios sectores de descarga, el cálculo de la evaporación desde la playa activa toma en consideración el tiempo en que cada uno de estos sectores se encuentra

descargando relaves. La descarga se realiza programadamente por sectores compuestos por cuatro spigots cada uno. El tiempo de descarga, para mantener la trayectoria de la laguna, no es arbitrario y obedece a un tiempo de descarga mensual por cada sector según el plan de depositación. Para el cálculo de la extensión promedio mensual se aplica la siguiente expresión:

$$\text{Área Húmeda} = \sum_k \lambda_k \times \Omega_k \quad (1.11)$$

Donde:

$\lambda_K$ : Tiempo de operación estimado mensual (%)

$\Omega_K$ : Superficie sector K [m<sup>2</sup>]

El tiempo de operación estimado mensual, se calcula respecto a los días de descargas en el mes en el sector K, por ejemplo si el tiempo de descarga en el sector 5 es de 10 días en el mes, el modelo asume una proporción de  $\lambda_5=33\%$  y la superficie del sector K es la superficie de la playa del sector de descarga, en el ejemplo anterior sería la superficie de la playa activa del sector 5.

### 5.2.3 Pérdida por evaporación desde la laguna

Estas pérdidas van referidas a la evaporación de agua que se produce desde la laguna, por lo que la ecuación depende de la superficie de esta y de la tasa de evaporación, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$A_{LAG} = T_{EE} \times \Omega_{LAG} \quad (1.12)$$

Donde:

$T_{EE}$ : Tasa de evaporación de embalse [mm/día]

$\Omega_{LAGUNA}$ : Superficie de la laguna [m<sup>2</sup>]

La superficie de la laguna es obtenida del modelo de crecimiento, y la tasa de evaporación es la misma utilizada para la pérdida por evaporación de agua desde la playa activa, por lo tanto se obtiene también desde el área de medio ambiente.

#### 5.2.4 Pérdidas por infiltración desde la laguna

Estas pérdidas se producen a través de dos estratos: del terreno natural que está en contacto con la laguna y a través del relave depositado subacuático. Se asume que la infiltración hacia el relave es despreciable en comparación a la que se presenta hacia el terreno natural, luego se toman las primeras infiltraciones señaladas:

$$A_{INF.LAGUNA} = (1 - \delta) \times \Omega_{LADERA} \times k_{TN} \times N_{día} \quad (1.13)$$

Donde:

$\delta$ : Factor de impermeabilización

$\Omega_{LADERA}$ : Superficie ladera en contacto con la laguna [m<sup>2</sup>]

$k_{TN}$ : Permeabilidad terreno natural [cm/s]

Para efectos de este análisis, Arcadis supone que  $\delta$  es 70%, producto de la impermeabilización de la ladera.

El valor de  $k_{TN}$  es estimado mediante mediciones de infiltración efectuadas en terreno. Este valor varía en el tiempo pero para el modelo balance de agua se considera un valor de  $10^{-4}$  [cm/s].

La superficie de la ladera se obtiene multiplicando el área de la laguna por un factor geométrico que se obtiene desde la pendiente del relave subacuático y la pendiente de la ladera



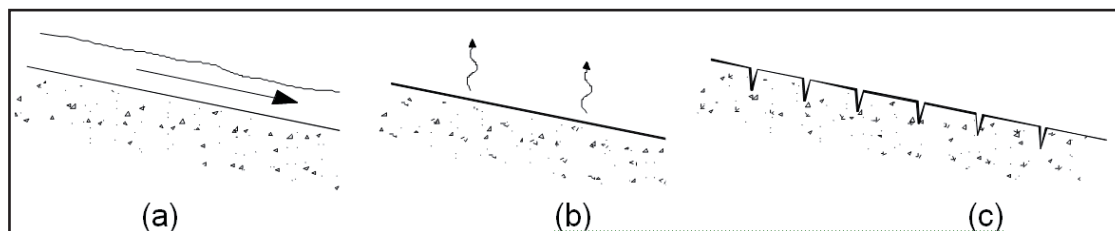
y cuyo valor es 0,13. La pendiente del relave subacuático se considera en 0,006, y la pendiente de la ladera en un valor de 0,04 según batimetría.

### 5.2.5 Pérdidas por resaturación de playas inactivas

Estas pérdidas se producen en el momento en que se reinicia la descarga sobre las playas secas (playas inactivas) debido al flujo de relave que está siendo depositado sobre el relave seco, resaturándolo.

El agua que se pierde por evaporación de las playas inactivas es parte de la que quedó retenida en el proceso de sedimentación (pérdida por retención), por lo que no se considera como pérdida de evaporación directa, para evitar la doble contabilidad. Sin embargo el agua del fenómeno de resaturación de la playa, una vez que comienza a descargarse nuevamente sobre ésta, sí debe ser considerada como pérdida.

En la Figura 13 se ve el proceso de depositación sobre la playa inactiva, una vez alcanzada la saturación. En la Figura 13 (b) se observa la etapa de secado una vez que la playa vuelve a su inactividad y en la Figura 13(c) se observa la playa inactiva seca hasta agrietarse.



*Figura 13: Saturación y secado de playas*

Arcadis destaca que la experiencia en otros proyectos ha comprobado que la evaporación desde las playas inactivas (en secado) es un fenómeno acotado que, en general, compromete un espesor superficial reducido, por lo que la pérdida de agua superficial disminuye en el tiempo. Esto se puede observar en la Figura 14, experiencia realizada por Arcadis en el depósito de relaves de Pampa Pabellón (Minera Collahuasi), en la cual se midieron los contenidos de humedad del relave a diferentes profundidades y en diferentes tiempos de

secado, entregando como resultante que en 100 días, el estrato superficial de relave de 0.5 [m] de espesor, tiene aproximadamente un 85% grado de saturación.

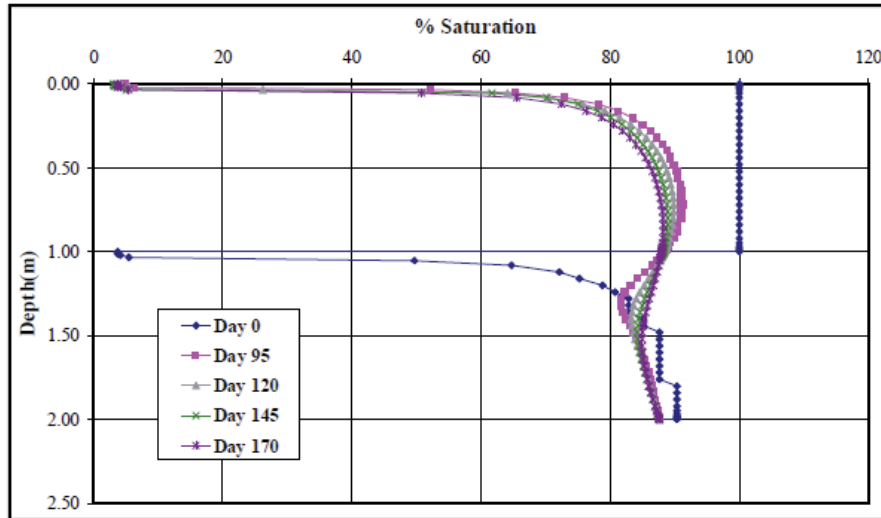


Figura 14: Curva de contenidos de humedad

El modelo representa esta pérdida con la siguiente ecuación:

$$A_{RESAT} = \varphi_1 \times \left( \Omega_{SECA} \times \frac{C_P}{C_0} \right)^{\varphi_2} \times T_E^{\varphi_3} \quad (1.14)$$

$$\Omega_{SECA} = \Omega_{INUND} - \Omega_{PLAYAS} \quad (1.15)$$

Donde:

$\Omega_{SECA}$ : Superficie playa inactiva [m<sup>2</sup>]

$\Omega_{INUND}$ : Superficie total inundada por relaves y laguna [m<sup>2</sup>]

$\Omega_{PLAYAS}$ : Superficie de la playa activa de relaves en directo [m<sup>2</sup>]

$T_E$ : Tasa de evaporación [mm/mes]

## 5. Modelo del Balance de Aguas del Tranque de Relaves Laguna Seca

---

$C_0$ : Concentración en peso base

$\varphi_k$ : Coeficiente de regresión

La superficie de inundación se estima mediante el modelo de crecimiento y la superficie de la playa activa se calcula mediante la misma ecuación ocupada en las pérdidas por evaporación desde playas.

La concentración en peso base es la condición inicial de la concentración en peso de sólidos y se considera igual a 51%. La tasa de evaporación viene de proceso de calibración, y no es la misma utilizada en las pérdidas por evaporación.

### 6. ANÁLISIS DE DATOS

El modelo lleva un par de años siendo utilizado para realizar las proyecciones de agua recuperada, entregando proyecciones de agua recuperada en [l/s] y en [m<sup>3</sup>/mes] de forma mensual y anual. A la vez, en el caso real, el flujo de agua a la salida del tranque es medido de forma instrumental. En el modelo, como se explicó en el capítulo anterior, este flujo es obtenido mediante cálculos utilizando las proyecciones de las plantas concentradoras las cuales entregan las proyecciones del flujo de relaves a obtener y su respectiva concentración de sólidos, lo que permite conocer el valor de agua de entrada al tranque.

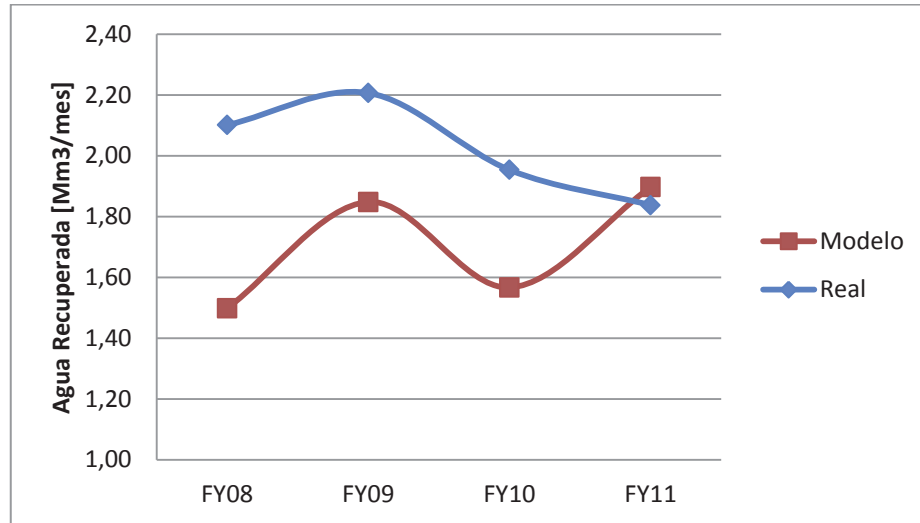
Con los datos entregados por el modelo, y los obtenidos del balance real, se ha construido un histórico mensual y anual el cual será analizado a continuación, para conocer como se ha comportado el modelo en sus proyecciones, tanto mensuales como anuales.

#### 6.1 Análisis Anual

El análisis anual considera el promedio de agua recuperada obtenido en [m<sup>3</sup>/mes] entre los doce meses comprendidos en un mismo año fiscal. Cada año fiscal comienza el mes de Julio y termina el mes de Junio del año siguiente.

Para el análisis anual se utilizan los datos históricos de agua recuperada de los cuatro últimos años fiscales FY08 - FY11, (Anexo D, páginas 90-91), y los promedios obtenidos se representan en el Gráfico 4.

## 6. Análisis de Datos



*Gráfico 4: Curva de agua recuperada con datos históricos mensuales promediados por año fiscal*

Observando el gráfico, se podría interpretar que las proyecciones entregadas por el modelo distan de la realidad aunque las curvas siguen una misma tendencia, no obstante, se debe considerar para el análisis que el valor de agua recuperada depende directamente del agua de entrada al tranque.

Como se mencionó anteriormente, el dato de agua de entrada es obtenido desde otras proyecciones (proyecciones de las plantas concentradoras), por lo que al tratarse de una proyección, esta no considera posibles imprevistos. Así, el valor del agua de entrada ocupado por el modelo (datos de proyecciones) es distinto al agua que realmente entro al tranque (datos reales), por ende para poder hacer una comparación entre los datos reales y los entregados por el modelo, se calcula una relación denominada “k”, esta relación k se calcula dividiendo el flujo de agua en análisis por el flujo de agua de entrada en cada caso, es decir, en el caso real se debe dividir por el flujo real de agua de entrada y en el modelo se debe dividir por el flujo de la proyección. Ecuación (1.16)

$$k = \frac{\text{Agua Recuperada}}{\text{Agua Alimentada}} \quad (1.16)$$

En la Tabla 2, se muestran los flujos mensuales de agua recuperada y de agua alimentada en [Mm<sup>3</sup>/mes] y su respectivo valor de k calculado.

*Tabla 2: Cálculo de la relación k para análisis anual*

	Agua Recuperada [Mm <sup>3</sup> /mes]		Agua Alimentada [Mm <sup>3</sup> //mes]		k	
	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo
FY08	2,10	1,50	6,90	6,34	0,30	0,24
FY09	2,21	1,85	6,73	6,67	0,33	0,28
FY10	1,95	1,64	5,92	6,19	0,33	0,26
FY11	1,84	1,90	6,28	6,60	0,29	0,29

Sin embargo, con los datos de la tabla, aunque las relaciones k obtenidas parecen muy similares, es necesario conocer que tan significativa es la diferencia entre estas para conocer si entrega una buena proyección, en otras palabras, si el modelo refleja el comportamiento real del tranque. Para conocer esto, se efectuará un análisis estadístico que permita la comparación entre estos dos métodos (real y modelo) año a año.

### 6.1.1 Análisis Estadístico Anual

Se pretende comparar los datos reales con los datos obtenidos desde el modelo, para evitar contabilizar el error provocado por diferentes imprevistos, en la sección anterior, se calculó el valor de la relación k la cual permite relacionar el agua recuperada con el agua de entrada, dato con el que se trabajará en este análisis.

Se utilizará un análisis estadístico conocido como comparación de pares de datos con la prueba de t de Student, el cual compara el valor del estadístico t con el valor crítico de t, el primero es obtenido mediante el cálculo utilizando otros valores estadísticos, y el otro es obtenido desde la tabla de “t de Student” (Anexo F, página 100) con el valor de significancia  $\alpha$  y los respectivos grados de libertad.

- Paso 1: Procesamiento de Datos

Como primer paso es necesario el cálculo de diferencias entre los métodos a comparar, es decir, las diferencias (d) entre los datos reales y los datos del modelo. Para tener una mejor precisión se trabajará con tres decimales. Tabla 3

*Tabla 3: Cálculo de diferencias para análisis estadístico anual*

	K <sub>REAL</sub>	K <sub>MODELO</sub>	% error	d=K <sub>REAL</sub> - K <sub>MODELO</sub>
FY08	0,304	0,236	22,36	0,068
FY09	0,328	0,277	15,51	0,051
FY10	0,330	0,265	19,80	0,065
FY11	0,293	0,288	1,71	0,005

- Paso 2: Cálculo de estadísticos

Para realizar una comparación entre t y t crítica, es necesario el cálculo de otros valores estadísticos muestrales: media, varianza y desviación estándar, los cuales se definen a continuación.

La media muestral ( $\bar{x}$ ) de un conjunto de observaciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  está dada por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.17)$$

Donde n es el tamaño de la muestra.

La varianza muestral, se denota por  $s^2$  y se define por:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (1.18)$$

La desviación estándar muestral (s), es la raíz cuadrada de la varianza:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (1.19)$$

Finalmente, el valor del estadístico de prueba t, está dado por:

$$t = \frac{\bar{x}}{s/\sqrt{n}} \quad (1.20)$$

Se debe considerar que para el cálculo de estos estadísticos se trabaja con los datos obtenidos de las diferencias entre k real y k modelo. Los estadísticos calculados se representan en la Tabla 4.

*Tabla 4: Valores estadísticos para análisis anual*

$\bar{x}$	0,047
s	0,029
n	4
t	3,241

- Paso 3: Comparación de estadístico t

Como se mencionó anteriormente, se debe comparar la t calculada  $t=3,241$  con la t crítica, la cual se obtiene mediante tablas de “t de Student” de la forma  $t_{\alpha;n-1}$ , por lo tanto, considerando los siguientes datos:

Nivel de significación de  $\alpha=0,05$

Grados de libertad:  $n-1= 4-1=3$

El valor desde tablas de  $t_{0,05;3}=2,353$ .

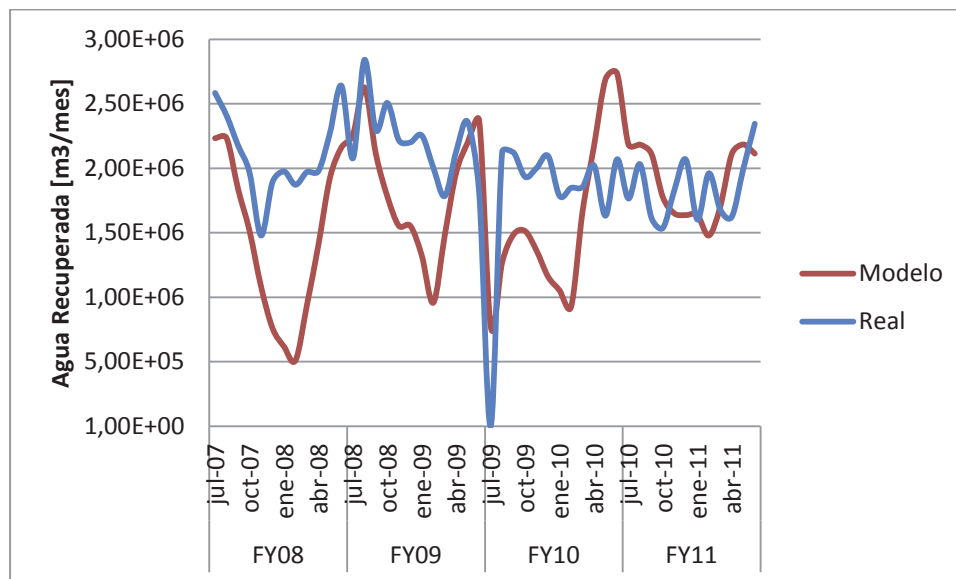
El valor de  $t_{0,05;3}=2,353$  representa el valor crítico de t, por lo tanto, mientras la t calculada sea menor a la t crítica no habrá diferencia significativa entre los métodos (real y modelo), y en el caso contrario que la t calculada sea mayor a la t crítica se tendrá diferencia significativa entre los métodos. Como  $t=3,241 > t_{0,05;3}=2,353$ , implica que la diferencia entre los datos reales y los datos entregados por el modelo es significativa.



Aún cuando el FY11 muestre un error de tan solo un 2%, entre el modelo y lo real, existe diferencia significativa de forma anual. Un análisis de una mayor muestra permite obtener una mayor precisión, por lo que se realizará, a continuación, un análisis estadístico mensual considerando estos mismos cuatro años fiscales.

## 6.2 Análisis Mensual

Para el análisis mensual se utilizan los datos históricos mensuales de agua recuperada en [m<sup>3</sup>/mes] de los cuatro últimos años fiscales FY08 - FY11, (Anexo D, páginas 90-91) y se representan en el Gráfico 5.



*Gráfico 5: Curva de agua recuperada mensual en [m<sup>3</sup>/mes]*

En el gráfico se observan ciertas imprecisiones entre las curvas, sin embargo, al igual que en el análisis anual, parte de las imprecisiones se deben a la diferencia entre el agua de entrada real y el agua real proyectada. Considerando los datos históricos mensuales, se realizará un análisis estadístico entre los flujos del modelo y los flujos reales, para conocer si los datos entregados por el modelo mensualmente respecto a los datos obtenidos realmente tienen una diferencia significativa. Se recurre al mismo análisis estadístico utilizado en el caso anual, con la diferencia que el tamaño de la muestra aumenta a 48, ya que se tienen 12 meses por año.

### 6.2.1 Análisis estadístico mensual de los últimos cuatro años fiscales

Este análisis estadístico, al ser una comparación entre mes real y mes modelo, también corresponde a un análisis de pares de datos utilizando t de Student. Se realiza un análisis estadístico mensual de los últimos cuatro años fiscales (FY08-FY11).

- Paso 1: Procesamiento de Datos

Desde datos históricos mensuales (Anexo D, páginas 92-93), se obtienen las diferencias de k modelo y de k real, representadas en la Tabla 5

*Tabla 5: Cálculo de diferencias para análisis estadístico mensual*

FY08	$d=K_{\text{real}}-K_{\text{modelo}}$	FY09	$d=K_{\text{real}}-K_{\text{modelo}}$	FY10	$d=K_{\text{real}}-K_{\text{modelo}}$	FY11	$d=K_{\text{real}}-K_{\text{modelo}}$
jul-07	0,028	jul-08	-0,025	jul-09	-	jul-10	-0,056
ago-07	0,023	ago-08	0,096	ago-09	0,049	ago-10	-0,006
sep-07	0,027	sep-08	0,037	sep-09	0,089	sep-10	-0,076
oct-07	0,052	oct-08	0,117	oct-09	0,082	oct-10	0,014
nov-07	0,059	nov-08	0,068	nov-09	0,125	nov-10	0,013
dic-07	0,155	dic-08	0,082	dic-09	0,154	dic-10	0,062
ene-08	0,204	ene-09	0,104	ene-10	0,145	ene-11	-0,010
feb-08	0,185	feb-09	0,139	feb-10	0,172	feb-11	0,109
mar-08	0,129	mar-09	0,035	mar-10	0,062	mar-11	0,048
abr-08	0,055	abr-09	0,030	abr-10	-0,007	abr-11	-0,050
may-08	0,016	may-09	0,021	may-10	-0,057	may-11	-0,017
jun-08	0,019	jun-09	-0,073	jun-10	-0,071	jun-11	0,034

- Paso 2: Cálculo de estadísticos

Para el cálculo de estos estadísticos se trabaja con los datos obtenidos de las diferencias entre k real y k modelo (Tabla 5) y se calculan los valores de los estadísticos muestrales: media, varianza, desviación estándar y estadístico t, utilizando las ecuaciones expuestas en el análisis anual. Cabe señalar que el valor muestral disminuye a 47 debido a que no se tiene información respecto a Julio 2009.

Los estadísticos calculados se representan en la Tabla 6:

*Tabla 6: Valores estadísticos para análisis mensual*

$\bar{x}$	0,051
s	0,071
n	47
t	4,906

- Paso 3: Comparación de estadístico t

Se obtiene mediante tabla la t crítica,  $t_{\alpha;n-1}$  (Anexo F, página 100), considerando los siguientes datos:

Nivel de significación de  $\alpha=0,05$

Grados de libertad:  $n-1= 47-1=46$

El valor desde tablas de  $t_{0,05;46}=2,013$

Obtenido  $t=4,906$  y t crítica  $t_{0,05;46}= 2,013$  , se analiza si la diferencia entre ambos métodos (real y modelo) es significativa, en el caso que t sea menor a t crítica, implica que no hay diferencia significativa entre los métodos, y en el caso contrario que t calculada sea mayor a t crítica se tendrá diferencia significativa. Como  $t=4,906 > t_{0,05;46}=2,013$  , la diferencia entre los datos reales y los datos entregados por el modelo es significativa.

### **6.2.2 Análisis estadístico mensual de cada año fiscal**

Como se observó en el análisis estadístico anual, en el último año fiscal (FY11), se tiene un error de un 2% lo que es bastante menor que el 20% que promedian los tres años fiscales anteriores (FY08, FY09, FY10). Por esta razón, se analizará también cada año fiscal por separado.

- Paso 1: Procesamiento de datos

Se utilizan las mismas diferencias calculadas en la Tabla 5 presentada en la sección anterior, y considerando cada año por separado, se pasa al siguiente paso para el cálculo de los estadísticos.

- Paso 2: Cálculo de estadísticos

Se calculan los valores de los estadísticos muestrales para cada uno de los años por separado: media, varianza, desviación estándar y t estadístico. Recordar que no se tienen datos en el mes de Julio 2009, por lo que el tamaño muestral del FY10 disminuye a 11.

Los estadísticos calculados, para cada año fiscal (FY08/FY09/FY10/FY11), se representan en la Tabla 7:

*Tabla 7: Valores estadísticos para análisis mensual de cada año fiscal*

	FY08	FY09	FY10	FY11
$\bar{x}$	0,079	0,053	0,067	0,005
s	0,069	0,061	0,083	0,053
n	12	12	11	12
t	3,965	2,974	2,688	0,348

- Paso 3: Comparación de estadístico t

Se obtiene mediante tablas la t crítica (Anexo F, página 100),  $t_{\alpha;n-1}$ , considerando los siguientes datos:

Nivel de significación de  $\alpha=0,05$

Grados de libertad (FY08, FY09, FY11):  $n-1= 12-1=11$

El valor desde tablas de  $t_{0,05;11}=2,201$

Grados de libertad (FY10):  $n-1=11-1=10$

El valor desde tablas de  $t_{0,05;10}=2,228$

Para los años fiscales FY08, FY09 y FY11, al tener la misma cantidad de datos, se considera el mismo estadístico t, el valor de  $t_{0,05;11}=2,201$ . Para el caso del FY10, se considera el mismo nivel de significación, por lo que el valor de  $t_{0,05;10}=2,228$ .

*Tabla 8: Valor de t calculada y t estadístico por año fiscal*

Año fiscal	FY08	FY09	FY10	FY11
t	3,965	2,974	2,688	0,348
$t_{\alpha;n-1}$	2,201	2,201	2,228	2,201
$t > t_{\alpha;n-1}$	sí	sí	sí	no

De la Tabla 8, se observa que el valor de t calculada es mayor en los tres primeros años fiscales, confirmando en estos tres años una diferencia significativa entre el modelo y lo real. En el caso del FY11, la t calculada es menor al estadístico, por lo que no existe diferencia significativa en este año. Sin embargo, que el último fiscal represente un comportamiento aceptable estadísticamente, no significa que el modelo este funcionando mejor, ya que es el único año del que se tiene un precedente así, para afirmar un buen comportamiento del modelo, es necesario tener más datos mensuales del último tiempo para analizar, con los cuales no se cuenta.

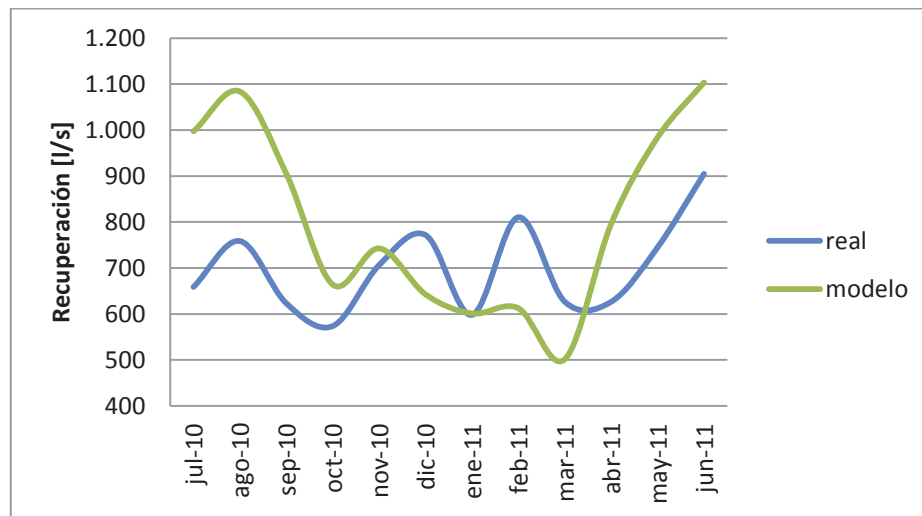
### 6.2.3 Análisis de comportamiento de curva mensual

Anteriormente, en el Gráfico 5 se observaron ciertas imprecisiones entre las curvas, sin embargo, al igual que en el análisis anual, estas se deben en parte a la diferencia entre el agua de entrada real y la proyectada. Sin considerar la diferencia entre las aguas de entrada, las curvas deberían tener una misma tendencia, ya que la función del modelo es entregar el comportamiento del tranque

## 6. Análisis de Datos

Se observa que la curva del flujo real se mantiene dentro de un intervalo más acotado, que en el caso del modelo. La curva del modelo muestra una diferencia entre el mes de Enero y el mes de Julio de cada año, en el primer mes se tiene la proyección de menor recuperación y el segundo mes se tiene la proyección de mayor recuperación.

Para acotar el análisis, se estudiará el comportamiento mensual del FY11 ya que este año fiscal fue el único que de forma mensual no presentó una diferencia significativa. Para evitar errores que dependan del agua de entrada, se calcularon los datos del modelo de agua recuperada utilizando los datos reales de agua de entrada del FY11 y se pasaron los flujos de [m<sup>3</sup>/mes] a [l/s], (Anexo D, página 94), para trabajar con cifras menores, estos resultados se representan a continuación en el Gráfico 6.



*Gráfico 6: Flujo de agua recuperada mensual del FY11 en [l/s]*

Observando en detalle el gráfico, la tendencia real tiene un comportamiento acotado que fluctúa siempre en un mismo rango, en cambio en el caso de la curva del modelo se genera una tendencia a una mayor recuperación en los meses de abril a septiembre y una menor recuperación en los meses de octubre a marzo, mostrando una tendencia a la estacionalidad.

En la Tabla 9 se muestran las temperaturas promedio de la región de Antofagasta y la tasa de evaporación obtenida desde el Tranque Laguna Seca. Se trabaja con la temperatura promedio de la región de Antofagasta y no con los datos históricos de las temperaturas de la estación

## 6. Análisis de Datos

---

meteorológica más cercana al tranque, debido a que son los datos más cercanos que se manejan a la zona del tranque. También se cuenta con los datos de de precipitación de la zona, los cuales promedian 0,1[mm] caídos en el FY11.

Respecto a la temperatura, se debe considerar que en la zona donde se encuentra ubicado el tranque Laguna Seca se manejan temperaturas más extremas, sobre todo en invierno, donde se llega a temperaturas bajo cero, pero como se mencionó anteriormente, el histórico de las temperaturas no se maneja, sólo se maneja la información de la tasa de evaporación.

*Tabla 9: Temperaturas en [°C] y Tasa de evaporación en [mm/día] en el FY11*

Mes	Temperatura [°C]	Tee (mm/día)
jul-10	12,4	3,90
ago-10	13,0	4,60
sep-10	13,9	6,70
oct-10	15,1	8,40
nov-10	16,7	9,80
dic-10	17,7	10,70
ene-11	19,4	10,50
feb-11	20,0	9,40
mar-11	18,8	8,10
abr-11	16,8	6,10
may-11	14,9	4,80
jun-11	15,0	3,80

Algunos alcances que se tienen observando los datos entregados en la Tabla 9, son la diferencia en la tasa de evaporación respecto a los meses y el que se maneje solo una tasa de evaporación, considerando que el modelo maneja pérdidas por evaporación de la laguna y pérdidas por evaporación de playas.

La tasa de evaporación promedio anual del FY11 es de 7,2 [mm/día], y se observa que es considerablemente menor en los meses más fríos; Julio 10, Agosto 10, Mayo 11 y Junio 11, en los cuales la tasa de evaporación promedia 4,3 [mm/día], y en los meses de más calor; Noviembre 10, Diciembre 10, Enero 11y Febrero 11 promedia 10,10[mm/día]. Respecto a los

meses restantes, (Septiembre 10, Octubre 10, Marzo 11 y Abril 11) la tasa se mueve cercana al promedio anual con un promedio de 7,3 [mm/día]. Por lo tanto, entre los meses de más calor y los de menos calor, hay una diferencia de aproximadamente 6,0 [mm/día], y a la vez entre un mes y otro, hay una fluctuación de más menos 1,0 [mm/día].

El tema de la estacionalidad, es de gran importancia, si se considera que en los meses de más frío se tiene una mayor recuperación de agua que promedia un flujo de 1042 [l/s] según el modelo y en los meses de más calor se tiene una menor recuperación de agua que promedia un flujo de 650 [l/s], respecto al Gráfico 6. No obstante, también se observa que el flujo real no refleja esta estacionalidad, esto básicamente se debe a que no se conoce el volumen de laguna mínimo de operación (el cual está definido como el mínimo volumen de laguna para que no haya riesgo de bombeo de sólidos), esto implica que no se conozca el stock de agua disponible para recuperar desde la laguna y se considere este stock dentro de las pérdidas. Por lo tanto, considerando los dos puntos anteriores, el flujo real de agua recuperada solo corresponde al flujo demandado por plantas sin considerar el flujo máximo que se podría tener de recuperación de agua.

Ahora, si se analiza el comportamiento de la pérdida por evaporación respecto las pérdidas totales (Anexo D, página 95), se ve que promedia en los últimos tres años fiscales un 37%, y que el último año creció de un 34% a un 45% posicionándose como la mayor de las pérdidas, lo cual la hace una pérdida bastante influyente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las pérdidas individuales son calculadas mediante ecuaciones del modelo y las pérdidas por evaporación dependen tanto de la tasa de evaporación como del área expuesta, por lo tanto, la tasa de evaporación por muy real que sea, el modelo no diferencia entre la de la laguna y la de las playas, sabiendo que el tipo de superficie de la laguna no es igual al tipo de superficie de las playas activas, a la vez, el área es aproximada mediante ecuaciones y no considera el crecimiento de las playas activas con el tiempo en el cual transcurre la depositación de relaves.

El modelo si muestra una tendencia válida respecto a la estacionalidad, por lo tanto, de continuar el modelo con el mismo error cercano al 2% que presenta el último año fiscal, el cual no es significativo, este podrá ser utilizado como una valiosa herramienta que entregue



una operación óptima del tranque. Esta operación óptima debe considerar el mayor flujo de agua disponible a recuperar mes a mes desde el tranque, flujo que debe ser seguro y que no provoque una futura disminución del volumen de la laguna al punto que no se pueda tener recuperación de agua.

### 7. PROPUESTAS DE MEJORAS

En las secciones anteriores se realizó el análisis estadístico de los datos históricos para conocer el comportamiento del modelo respecto al comportamiento real del tranque de relaves Laguna Seca, el cual mostró una diferencia significativa, de forma anual y mensual, entre los comportamientos. También se conoció la importancia del uso de agua recuperada en el proceso, la cual radica en su bajo costo frente a los otros suministros que llegan a tener un costo nueve veces mayor que esta agua y a la disponibilidad de este suministro frente a los suministros de agua fresca los cuales se ven limitados por normativas ambientales. Así, nace la importancia, de junto con validar el modelo, proponer mejoras a este que permitan hacer de este modelo una herramienta mejor y mucho más completa.

Estas propuestas van enfocadas a tener un modelo más completo y eficiente, que entregue proyecciones satisfactorias, tanto anuales como mensuales, y que principalmente busque obtener la optimización de la operación del tranque de relaves, la cual se basa en la mayor recuperación de agua posible, buscando el control de las pérdidas más influyentes mediante las variables manejables que presentan y considerando otros factores como son el costo y los requerimientos operacionales de los equipos.

## 7.1 Propuestas de Mejoras al Modelo

Las siguientes propuestas van enfocadas a cambios globales en el modelo y cambios en la forma de enfocar el modelo, principalmente en el objetivo del modelo, actualmente el principal objetivo del modelo es obtener las proyecciones de agua recuperada desde el tranque, no obstante el modelo debería considerar una optimización de la operación del tranque, en la cual sea posible encontrar la mejor combinación de factores, considerando como finalidad aumentar la recuperación de agua desde el tranque. Dentro de los factores a considerar, es importante el manejo de las variables que permiten disminuir las pérdidas, señaladas en el párrafo siguiente, como también es importante el rango de operación de los equipos y a la vez que no se vea afectado el costo de recuperación del agua.

Es necesario tener en cuenta que los datos históricos utilizados para ajustar el modelo no representan el funcionamiento óptimo del tranque, lo que implica a la vez que el modelo no esté entregando una respuesta optimizada de la recuperación, por lo tanto es necesario encontrar la curva de operación óptima del tranque. Como variables controlables para la minimización de pérdidas, se tiene el volumen de la laguna, las áreas de las playas y laguna y el plan de depositación de los relaves en el tranque.

Para obtener la operación óptima se deben considerar los siguientes puntos:

- Inclusión curva variación de volumen en el tiempo ( $dV/dt$ ): actualmente, el equipo encargado de realizar las batimetrías de la laguna se encuentra en período de prueba. Pese a esto, se sabe que la laguna ha enfrentado un crecimiento en los últimos años, lo que implica cambios de volumen en el tiempo, por lo cual es necesario incluir estos cambios en la resolución del modelo, puntualmente en Fase 2, mediante una curva de variación de volumen en el tiempo. Para esto también es necesario considerar la operación óptima del tranque, por lo que se propone construir la curva  $dV/dt$  una vez que el tranque comience a operar óptimamente, ejemplificado en las Figuras 15 y 16.

- Estacionalidad: debido a la influencia de las estaciones del año en el comportamiento del tanque, evidenciadas en el capítulo anterior, puntualmente la influencia en las pérdidas por evaporación, se debe tener presente esta estacionalidad en la inclusión del modelo, lo cual se traduce para la optimización de la operación que es necesario obtener una curva óptima y no un solo punto óptimo, ya que una curva permitirá obtener el comportamiento en las distintas épocas del año.
- Volumen mínimo: es importante conocer el volumen mínimo de operación, ya que con este volumen es posible saber el stock disponible de agua a recuperar desde la laguna, es decir, el volumen de agua sobre el volumen mínimo que se encuentra disponible para ser recuperado. El volumen mínimo corresponde al volumen de laguna mínimo necesario para no tener riesgo de bombeo de sólidos, este volumen es variable en el tiempo, debido al cambio en la superficie bajo la laguna por la depositación de nuevos relaves, también es importante considerar la cota mínima que debe haber entre la succión y la superficie del relave que se va depositando bajo la laguna.

Actualmente, este volumen mínimo se desconoce, las personas encargadas del modelo, pertenecientes a la empresa asesora Arcadis, aseguran que se está trabajando lejos de este volumen y sin entregar un valor preciso creen que este debería estar cercano a los  $0,5[\text{Mm}^3]$  frente a los  $3,0[\text{Mm}^3]$  en que se encuentra aproximadamente el volumen de la laguna.

A continuación, se explicará en dos pasos la propuesta anterior, los datos utilizados no son representativos del tanque, y fueron utilizados solo a modo de ejemplificar la propuesta. Ambos pasos son necesarios para obtener la curva de variación de volumen en el tiempo,  $dV/dt$ , considerando el volumen de la laguna en un período de operación óptima del tanque de relaves.

## 7. Propuestas de Mejoras

- Paso 1: Construcción curva de volumen de la laguna, operando a las condiciones óptimas del tranque.

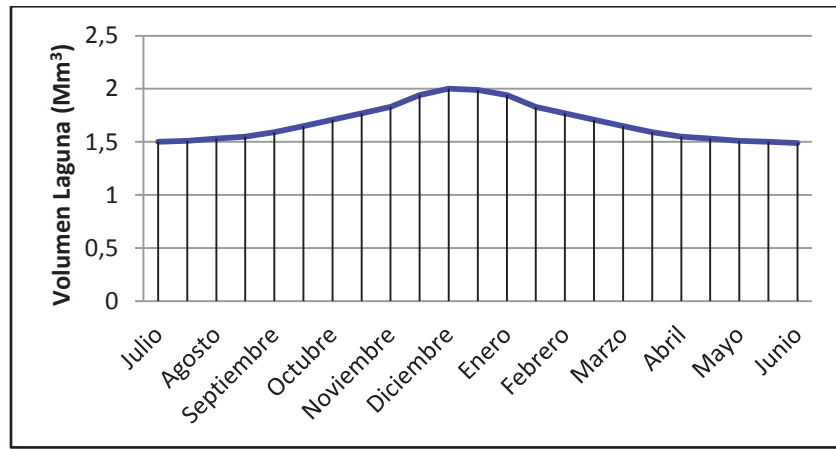


Figura 15: Curva de volumen de la laguna a operación óptima [Mm³]

- Paso 2: Con respecto a la figura anterior, se obtiene la curva de variación de volumen en el tiempo,  $dV/dt$ , como se muestra en la Figura 16.

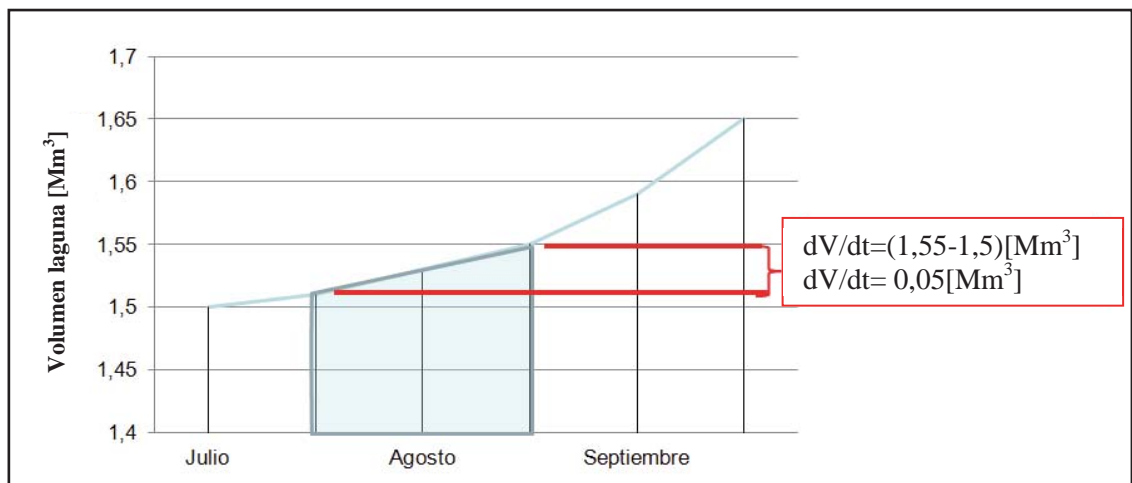


Figura 16: Obtención curva  $dV/dt$  a operación óptima [Mm³]

Finalmente, de los dos pasos ejemplificados, se obtiene una curva de variación de volumen en el tiempo, obtenida solamente desde datos históricos representativos a la operación óptima del tranque Laguna Seca.

## 7.2 Propuestas de Mejoras Específicas al Modelo

Estas propuestas de mejoras van enfocadas en mejorar la calidad de los datos de entrada en los cálculos de las distintas ecuaciones que conforman el modelo, se enfoca principalmente en aquellos que presentan oportunidades de mejora respecto a la aplicación de tecnología disponible que permiten obtener datos más precisos y reales.

### 7.2.1 Cálculo de pérdidas por evaporación

El modelo considera en las pérdidas por evaporación, una misma tasa de evaporación tanto para la laguna como para las playas, y no considera la diferencia entre la superficie líquida de la laguna y la superficie del relave. Las pérdidas por evaporación muestran una gran influencia en el total de las pérdidas, llegando a superar en el último año el 40% del total de las pérdidas. Como no se tiene una comparación de esta pérdida con un valor real y solo es obtenido este valor mediante el modelo es importante encontrar la mejor forma de cálculo para estas pérdidas, para esto se propone mejorar la medición de la tasa de evaporación incluyendo tecnología satelital disponible la cual permite tener una tasa de evaporación por pixel de las imágenes satelitales analizadas, a la vez, para complementar el uso de la tecnología satelital es necesario la incorporación de evaporímetros en el tranque ya que la estación meteorológica se encuentra fuera del área del tranque.

#### 7.2.1.1 Instalación de evaporímetros

Para la instalación de evaporímetros en el tranque, se evaluaron dos alternativas:

**Alternativa 1:** Estación meteorológica de seis canales más sensor electrónico para evapotranspiración. Sus principales características son:

Estación Meteorológica:

- Rango de temperatura:  $-30[^\circ\text{C}]$  a  $60[^\circ\text{C}]$ . Opcionalmente puede considerarse un pack de baterías para extender rango hasta  $80[^\circ\text{C}]$ .

## 7. Propuestas de Mejoras

---

- Alimentación: Incluye Panel Solar.
- Calificación ambiental: Resistente a la intemperie, testado a NEMA 6.
- Acceso a los datos: A través de la WEB a través de una contraseña

### Sensor Electrónico para Evapotranspiración:

- Exactitud:  $\pm 1\%$  de agua evaporada
- Capacidad: 304.8 [mm] por llenado
- Salida: 1 pulso por 0.254 [mm].
- Incluye Panel Solar de 5[W] y Batería 12[V] 4.2 [AH]
- Incluye Adaptador de entrada de pulso, modelo S-UCC-M001
- Debe instalarse después de la última helada de primavera y retirar antes de la primera helada de otoño (un tubo interno se quiebra cuando se congela).
- Debe llenar manualmente el sensor (por turno).

**Alternativa 2:** Estación meteorológica de seis canales más evaporímetro convencional con rescate satelital. Sus principales características son:

### Estación Meteorológica:

- Encapsulado NEMA 6 a prueba de mal tiempo
- Sensores plug & play
- Alimentación. Batería de 2.5 [AH] recargable por panel solar
- Incluye modem satelital interno
- Incluye panel solar de 1.2 Watts interno

### Evaporímetro:

- Bandeja de Evaporación
- Base de madera
- Transductor electrónico de evaporación con salida análoga
- Sistema de llenado automático
- Accesorios de montaje
- Trípode y Modem Satelital

La implementación de estos instrumentos es un complemento de la tecnología satelital a incorporar, la cual se explicará a continuación.

### **7.2.1.2 Aplicación de Tecnología Satelital**

Para precisar el cálculo de las pérdidas por evaporación, se propone recurrir a la tecnología disponible. Actualmente, el área de Aguas y Tranque dispone de dos imágenes satelitales mensuales y un DEM anual (Modelo de Elevación Digital).

Las imágenes satelitales, poseen una gran resolución, obteniendo desde su análisis, información de gran precisión, por otra parte, un modelo de elevación digital es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas X e Y a las que se les agrega un valor Z que corresponde a la elevación. Por lo que ambos son herramientas muy valiosas para la obtención de datos.

La empresa Gesecology, especialista en el rubro de tecnología satelital, es la encargada de la obtención de las imágenes y del análisis de esta información.

Se propone implementar esta tecnología de dos formas para la mejora del modelo, la primera es el cálculo de la evaporación por el modelo SEBAL y la segunda es la calibración de datos de áreas de playas y laguna, estas se explican a continuación.



### 7.2.1.3 Inclusión modelo SEBAL

El modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), es un modelo el procesador de imágenes para calcular evapotranspiración por diferencia en el balance energético, desarrollado en Holanda y aplicado en numerosos países en desarrollo. La evapotranspiración es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación, como en el caso del tranque Laguna Seca no se tiene vegetación, la evapotranspiración es igual a la evaporación.

Se utilizan datos climáticos como parte de los datos de entrada al modelo SEBAL y para el posterior contraste de resultados. Los datos diarios necesarios son: temperaturas máximas y mínimas, presión de vapor, velocidad del viento, precipitación y radiación incidente.

El algoritmo SEBAL, resuelve el balance de energía celda a celda a partir de imágenes de satélite y de algunos datos que se obtienen de modelos de elevación digital. El balance de radiación se obtiene a partir de la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre menos la emitida por la misma. La radiación neta, RN, supone el aporte energético total que se invierte en tres procesos: flujo de calor en el suelo ( $G_0$ ), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente ( $\lambda_E$ ). El algoritmo SEBAL obtiene el valor del flujo de calor latente como término residual de la ecuación 1.21, estimando previamente para cada celda de la imagen los valores de RN, G y H sucesivamente.

$$RN = H + \lambda_E + G_0 \quad (1.21)$$

Donde:

RN: Radiación neta [ $Wm^{-2}$ ]

H: Calor sensible [ $Wm^{-2}$ ]

$\lambda_E$ : Calor latente [ $Wm^{-2}$ ]

$G_0$ : Flujo calor en el suelo [ $Wm^{-2}$ ]

## 7. Propuestas de Mejoras

En una primera parte, desde una imagen satelital, se calcula la reflectancia y radiancia de cada pixel, con lo que se obtiene la radiación neta (RN), primera variable que ingresa al balance de energía. También, desde las imágenes, se obtienen las variables de índice normalizado de vegetación (NDVI), la temperatura superficial ( $T_0$ ) y la altura de aspereza superficial ( $Z_{0m}$ ). Posteriormente con NDVI y RN, se obtiene una aproximación del flujo de calor del suelo  $G_0$ , segunda variable que ingresa al balance de energía.

Finalmente, utilizando las variables  $T_0$  y  $z_{0m}$ , junto con la velocidad del viento ( $u_x$ ) medida cerca de la superficie en la zona de estudio, y la identificación de puntos con evaporaciones máximas y mínimas, se obtiene la tercera variable para el balance de energía superficial; el flujo de calor sensible (H).

Estas tres variables, ingresan a la ecuación de balance de energía, y de ella se obtiene la evaporación por diferencia para cada pixel. En consecuencia, el flujo de calor latente  $\lambda_E$ , queda en función de las variables analizadas; RN,  $G_0$  y H y de los parámetros que las influncian.

A continuación, en la Figura 17 se representa el funcionamiento del algoritmo SEBAL:

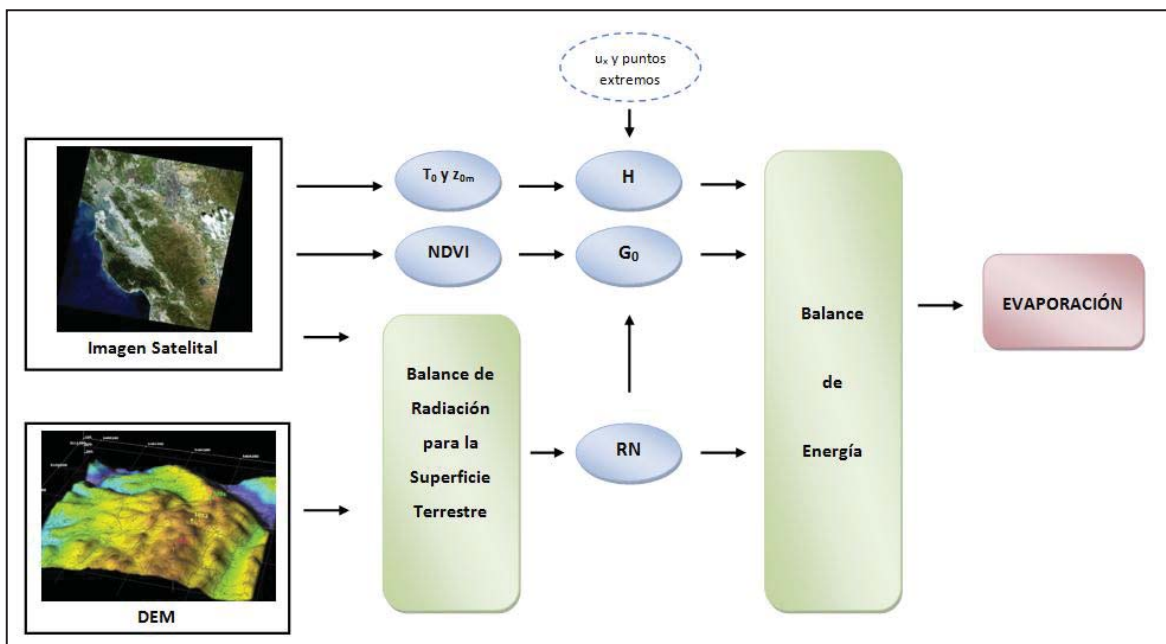


Figura 17: Descripción general de funcionamiento del algoritmo SEBAL

La ventaja de este modelo, frente a otros que permiten obtener también la evapotranspiración, es que se puede aplicar a grandes zonas geográficas sin perder su validez, ya que no se basa en observaciones sinópticas específicas de una estación determinada. Por lo anterior, SEBAL representa una herramienta de mapeo de evapotranspiración, donde se observan fenómenos en distintas escalas validados espacialmente por el contraste hidrológico de la zona, requiriendo pocos datos meteorológicos y observaciones de alturas de vegetación. La aplicación de SEBAL no se limita solamente a fenómenos observados en diversas escalas, dependiendo de la resolución, sino también se extiende a su aplicación a diversos satélites y resoluciones, esto puede ser validado por mediciones in situ si las imágenes poseen alta resolución. De la misma forma, en presencia de una alta resolución de datos, existe la posibilidad de obtener datos estadísticos y densidades de probabilidad de algunas variables meteorológicas esenciales.

SEBAL proporciona un algoritmo definido, aplicable a climas diferentes y a diversos usos de suelo. Este es un modelo autónomo, que no requiere de modelos anexos para complementar su funcionamiento y mejorar su desempeño, lo que agrega simplicidad a su aplicación. Una exigencia importante del modelo es que requiere en su funcionamiento cielos despejados, como una condición crítica para su aplicación, como también exige un gran contraste hidrometeorológico para efectuar las regresiones con las que se obtiene el flujo de calor sensible. Condiciones que se cumplen perfectamente en la zona del tranque Laguna Seca.

La idea de incorporar este modelo para el cálculo de la evaporación en el tranque Laguna Seca, nace de un estudio de tesis que evaluó el modelo en zonas de gran contraste hidrológico y geográfico, con características variadas, y climas diversos, con la finalidad de aportar con un modelo de evapotranspiración en escalas espaciales importantes al desarrollo agrícola en la zona central de Chile, exactamente en la cuenca del río Maipo. Este estudio trabajó con imágenes procesadas del satélite Landsat 5, que indican la evapotranspiración, instantánea, horaria, y diaria, de la fecha correspondiente a la toma de la imagen, con valores para todas las zonas de la imagen, incluyendo zonas de la Cordillera de los Andes, con píxeles de 25 [m] de ancho, encerrando un área de 625 [m<sup>2</sup>]. La validación respecto a los datos reales entregó un error cuadrático medio de 0,0018 [mm/h], demostrando que el algoritmo SEBAL es una buena opción a la hora de obtener la evaporación.

### 7.2.1.4 Calibración áreas playas activas, inactivas y laguna

Las áreas utilizadas en el modelo para el cálculo de evaporación son calibradas mediante datos que no son reales. Con el análisis de las imágenes satelitales es posible obtener datos de áreas reales con los cuales se propone calibrar las actuales ecuaciones de área para no tener que recurrir a la estimación de estas.

Gesecology es la empresa encargada de analizar las imágenes para la obtención de los datos. Para este análisis realizan una clasificación de las áreas (en acuerdo con MEL y Arcadis), donde caracterizan por colores las zonas de interés, como se explica a continuación.

#### Criterio de rangos para la clasificación de las áreas de las imágenes satelitales:





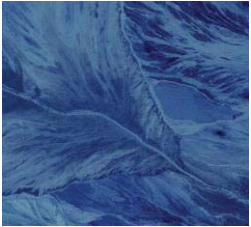
Los criterios de los rangos para la clasificación supervisada con los software de sistemas de información geográfica (SIG), fueron planificadas en conjunto entre MEL y Gesecology.

El primer paso es la clasificación. Se definieron siete zonas, las que son extraídas de cada imagen.



- Zona de Terreno Natural (1)
- Zona de Relave Seco (2)
- Zona de Relave Consolidado (3)
- Zona de Depositación anterior a la actual (4)
- Zona de Depositación actual (5)
- Zona de Espejo de Agua (6)
- Zona de Espejo de Agua claro de baja profundidad (7)

Cada una de estas zonas son definidas a continuación, dadas las apariencias de los colores del tranque de relaves Laguna Seca, los cuales fluctúan en un rango visible de la imagen satelital entre 0 a 255 en la paleta de colores.

## 7. Propuestas de Mejoras

<ul style="list-style-type: none"><li>• La <b>zona 1</b>: terreno natural y en el cual nunca se han depositado relaves.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• La <b>zona 2</b>: zona en que se ha depositado relaves, pero la depositación es tan antigua que el relave ha perdido prácticamente todo el contenido de agua que poseía.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• La <b>zona 3</b>: superficies de depositación donde en un pasado cercano (uno o dos meses) se han descargados relaves. Presenta contenidos de humedad mucho menores que el relave fresco.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• La <b>zona 4</b>: sector de depositación anterior al sector actual de depositación. Este relave ha comenzado a consolidarse y presenta menor contenido de agua que el sector de playa activa.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• La <b>zona 5</b>: sector actual de depositación y cuyo contenido de humedad es muy similar al de la descarga.</li></ul>	

## 7. Propuestas de Mejoras

<ul style="list-style-type: none"> <li>• La <b>zona 6</b>: superficie de agua clara, corresponde a la masa de agua que se ha separado del relave, acumulándose en el centro del tranque. Contiene una pequeña cantidad de sólidos en suspensión.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La <b>zona 7</b> corresponde a la denominada superficie de agua clara de baja profundidad.</li> </ul>	

Una vez realizada las siete clasificaciones y realizada la vectorización de cada polígono se asignan colores a cada clasificación, es decir, todos los colores representativos de cada zona son representados en un solo color el cual es definido por un rango por pixel, cada pixel tiene un color R (rojo), G (verde) y B (azul) los cuales fluctúan en los rangos anteriormente mencionados. Finalmente se obtiene la siguiente clasificación entregada en la Tabla 10:

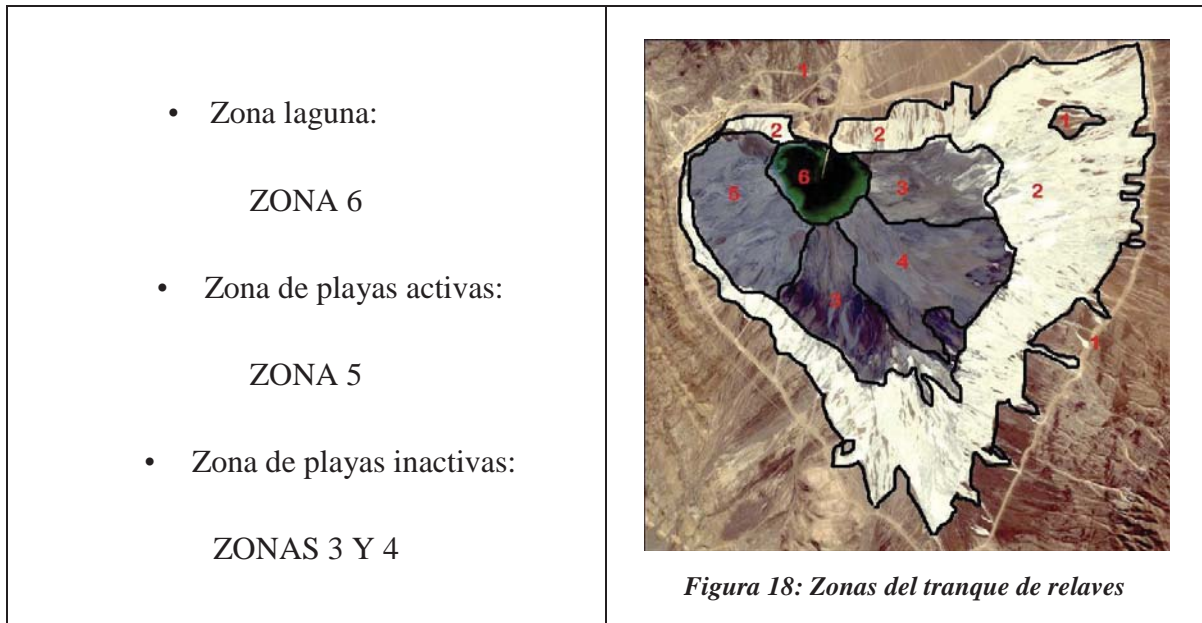
*Tabla 10: Rangos por pixel para la clasificación de áreas*

<b>RANGOS POR PÍXEL</b>	<b>R</b>	<b>G</b>	<b>B</b>
Zona 1	168	102	25
Zona 2	255	255	255
Zona 3	0	158	194
Zona 4	25	13	161
Zona 5	32	20	97
Zona 6	0	51	0
Zona 7	0	102	0

Sin embargo, se propone trabajar con dos clasificaciones más, complementarias a esta, las cuales se definan por temperatura superficial y humedad. A la vez, para la calibración es

## 7. Propuestas de Mejoras

necesario trabajar los mismos criterios entre las tres empresas (MEL, Arcadis, Gesecology), por lo que las zonas se reclasificaron en playas activas, playas inactivas y laguna, como se muestra a continuación en la Figura 18:



Se debe tener en cuenta que las imágenes son tomadas en un momento específico en el cual se está descargando por un sector puntual y las áreas estimadas por el modelo son mensuales. Por consiguiente, el área del modelo representa un área promedio mensual entre las distintas áreas obtenidas con respecto a la descarga, por ejemplo, si se realizó la descarga de los primeros 15 días del mes de Abril por el sector 5, se tiene un área de playa activa correspondiente al sector 5 (todas las demás playas de los otros sectores son inactivas), pero en la segunda parte del mes de Abril se realiza la descarga por el sector 4 (ya no por el sector 5), por lo tanto, el área de playa activa corresponde al sector 4 y todos los demás sectores tienen playas inactivas, esto implica que el cálculo de playa activa para el mes de Abril, mediante el modelo, considere tanto el área del sector 4 como el área del sector 5 por la respectiva fracción de tiempo en que se depositó en cada sector (como se depositó la mitad del mes en cada sector, la fracción de tiempo por la que se multiplica cada área de playa activa es de 0,5), y no considere el

crecimiento que tuvo la playa activa al pasar los días de depositación. Sin embargo, en el caso de la fotografía, si esta fue tomada en la primera quincena del mes de Abril, su área solo considera el sector 5, y más exactamente, si la imagen es de los primeros días de descarga del mes de Abril, el área de playa activa será menor a si la imagen es tomada en el día 15 de este mismo mes, por lo que es posible conocer el crecimiento y el comportamiento que tuvo la playa activa mediante la depositación.

Por lo tanto, para que el área estimada por el modelo represente el área de la imagen, se debe calibrar las áreas, considerando el sector de descarga en el momento en que se tomo la imagen satelital y el tiempo en que se lleva descargando en este sector.

### **7.2.2 Incorporación plan de depositación**

Otro punto importante para la mejora del modelo, es la inclusión del plan de depositación en la calibración de las áreas, el cual mes a mes planifica la zona de descarga y el tiempo en que se descargara en cada zona. Con esta implementación, se puede obtener un comportamiento de las playas que son activas y pasan a ser inactivas y viceversa, se podrá estudiar también el comportamiento de las playas que estuvieron mucho o poco tiempo activa y mucho o poco tiempo inactiva.

Conocer el comportamiento en general de las playas es importante, ya que las zonas de descarga no son simétricas y no cuentan con la misma pendiente ni con la misma distancia de descarga, por lo que la descarga no se comporta de igual forma en todas las playas.

### **7.2.3 Cálculo pérdidas por infiltración**

La pérdida por infiltración se produce por el contacto de la laguna de clarificación con el terreno natural, para controlar esta pérdida se tiene la posibilidad de recubrir la superficie del terreno natural con una geomembrana, sin embargo esta alternativa tiene un alto costo. Actualmente se cuenta con un 70% de la ladera nor-poniente del tranque impermeabilizada y se cuenta con una cotización por parte de Arcadis para estudiar alternativas de métodos de impermeabilización de la ladera nor-oriente.



Sin embargo, dentro de esta pérdida no se ha considera la variación de la permeabilidad del terreno natural, pendiente del relave subacuático y pendiente de la ladera, valores con los que trabaja el modelo y son variables.

La permeabilidad del terreno natural ( $k_{TN}$ ), puede ser estimada mediante mediciones de infiltración efectuadas en terreno, por lo que de ser aprobada la cotización de Arcadis se propone aprovechar las mediciones para calibrar este valor.

La pendiente del relave subacuático se refiere a la pendiente que se genera en el relave depositado y que se encuentra bajo la laguna, a medida que se va depositando más relave la pendiente varía. La pendiente de la ladera es la pendiente que tiene el terreno natural en contacto con la laguna El valor de ambas pendientes es posible actualizarlo mediante batimetrías. De igual forma se plantea con batimetrías obtener las pendientes, y con un histórico de las batimetrías ver el comportamiento de estas en el tiempo y ver si tienen grandes variaciones.

### **7.2.4 Cálculo pérdidas por resaturación**

Estas pérdidas aumentan tal que la superficie de los relaves aumente, debido a que se tiene más superficie expuesta a la evaporación. Sin embargo, no se tiene una curva de contenidos de humedad propia del tranque, esta curva permite conocer el contenido de humedad a diferentes profundidades y en diferentes tiempos de secado lo cual es fundamental para el cálculo de esta pérdida. Es necesario por tanto generar esta curva propia del tranque Laguna Seca para incluirla en el modelo.

En cuanto a las áreas de las playas inactivas, las cuales son utilizadas para el cálculo de esta pérdida, al igual que en la pérdida por evaporación no se utilizan datos reales para la calibración, por lo que se propone utilizar imágenes satelitales para la obtención de datos reales para la calibración.

### **7.3 Propuestas de Mejoras a la Plataforma**

El modelo del balance de aguas del Tranque Laguna Seca, es ejecutado mediante Microsoft Excel. En él se tiene una serie de planillas que en conjunto de macros y fórmulas permiten obtener una proyección de los flujos de interés.

La simulación del tranque es bastante compleja, por lo que aunque Excel es una excelente plataforma, no es suficiente para la implementación de nuevas mejoras, a la vista de este problema es necesaria la evaluación de una actualización de la plataforma a un software propio que permite la implementación de mejoras sin restricciones.

Por otro lado, el estudio de las planillas del modelo es bastante complejo ya que en estas se observa una serie de descoordinaciones entre la nomenclatura de las variables de los informes de Arcadis y las de la planilla, seguido por una serie de datos que no poseen nombre alguno. Por las razones anteriores, es necesario realizar una limpieza de la actual plataforma para facilitar la lectura de datos y el entendimiento del modelo.

### **7.4 Propuestas de Mejoras Externas**

Estas mejoras van enfocadas a aquellas oportunidades que son externas al modelo pero que significan una mejora en cuanto a la calidad de los datos de entrada. En este punto se considera solo una oportunidad que se desprende de la deficiencia en la medición del porcentaje de sólidos ( $C_p$ ), responsabilidad de MEL, y del cual no hay medición en la mezcla de relaves proveniente de ambas plantas concentradoras y que se descargan en el Tranque Laguna Seca.

Este valor afecta directamente al valor de agua de entrada al tranque, flujo de gran relevancia en el balance del modelo.

Actualmente el valor de la concentración de sólidos ( $C_p$ ) es obtenido mediante mediciones manuales realizadas por los operadores del tranque. Sin embargo, la concentración de sólidos sólo es posible medirla en los relaves provenientes de la planta concentradora Los Colorados,

esto implica no tener información respecto al relave proveniente de la concentradora Laguna Seca y de la mezcla de ambos relaves.

Como bien se mencionó, el agua de entrada depende de la concentración de sólidos del relave, conocida como Cp. Este valor se obtiene mediante mediciones manuales, sin embargo no se tiene un mayor control sobre estas mediciones, realizándolas varias veces en el día sin un plan de medición diaria, lo que por consecuencia hace que el valor del Cp sea poco confiable.

La mejora en el sistema de medición va orientada a medir de forma precisa y confiable el porcentaje de sólidos que tenga el relave depositado para así obtener un valor lo más real posible de agua de entrada. Esta no es una mejora directa al modelo, sino una mejora que permite ingresar datos más precisos al modelo, ayudando a mejorar la precisión de la respuesta entregada.

Se proponen variadas alternativas de mejora en la medición del porcentaje de sólidos, sin embargo, la implementación de ellas en conjunto permitirían tener una comparación entre los datos, minimizando el riesgo de trabajar con datos erróneos, ya que cualquier diferencia considerable entre los métodos de medición, implicaría una revisión de estos, impidiendo errores por equipos mal calibrados.

Dentro de las alternativas posibles, se propone:

- Plan de medición diaria del porcentaje de sólidos, es necesario que los operadores realicen un mínimo de ocho mediciones diarias para trabajar con un Cp promedio representativo.
- Implementación densímetro, este instrumento de medición permite obtener la concentración del sólido con una muy buena precisión, sin embargo se debe tener la precaución de calibrarlo frecuentemente.
- Monitoreo en línea, poder tener los datos en línea permite trabajar con ellos directamente, lo que agiliza el proceso de obtención de datos y a la vez permite tener un respaldo de las mediciones.

## 7. Propuestas de Mejoras

---

- Implementación de puntos de medición en los relaves proveniente de las dos plantas concentradoras y en el cajón de mezcla de ambos.

## CAPITULO VIII

### 8. ANÁLISIS DE COSTOS ASOCIADOS

En los capítulos anteriores se encontraron situaciones en donde el modelo no respondía como se esperaba, sin embargo también se buscaron posibles soluciones para hacer de este modelo una mejor herramienta y que a la vez pudiera entregar resultados mucho más precisos.

En este capítulo se analizarán los costos asociados a los problemas antes analizados, para conocer la relevancia de estos problemas y el ahorro económico que las soluciones a estos problemas implican.

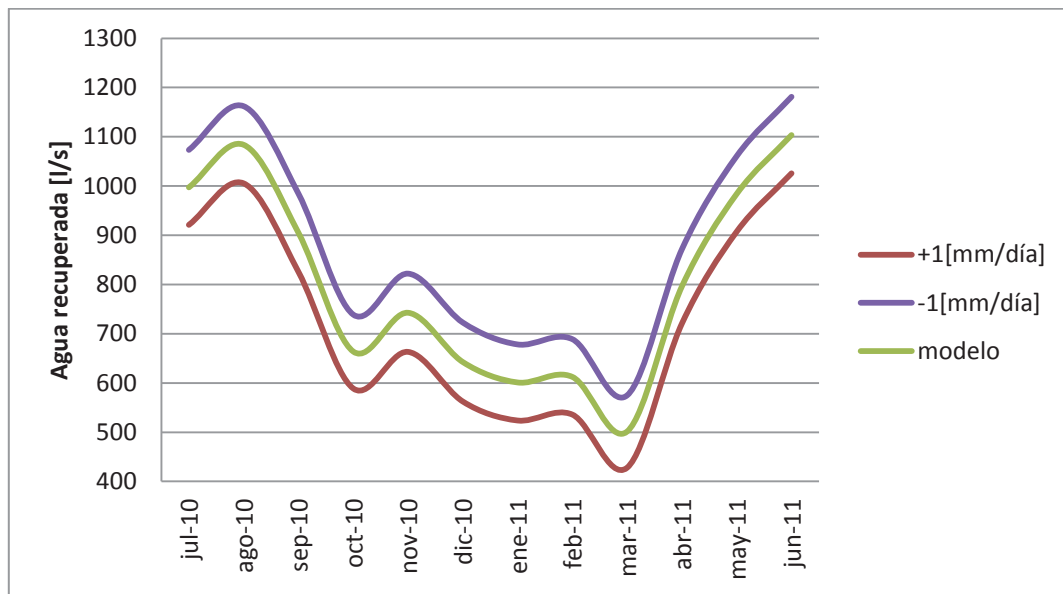
#### 8.1 Costos Asociados a la Sensibilidad

Como se observo en la Tabla 9 existe una diferencia de más menos 1,0[mm/día] en la tasa de evaporación de un mes a otro y a la vez existe una gran variación entre los meses de más calor y los meses más fríos, de aproximadamente 6,0[mm/día]. Debido a estas variaciones, y conociendo que la tasa de evaporación no es precisa en su medición debido a que la ubicación de la estación meteorológica se encuentra fuera del tranque de relaves y que a la vez es utilizada la misma tasa de evaporación tanto en las pérdidas de evaporación de playas activas como en las pérdidas de evaporación de la laguna, se analizará la importancia de tener una buena medición de este dato y los efectos que tiene en lo económico.

## 8. Análisis de Costos Asociados

Se realiza una sensibilidad en la variable de tasa de evaporación, considerando una variación de +/-1[mm/día] en la tasa de evaporación real, obteniendo como respuesta el agua recuperada en [l/s]. (Anexo E, páginas 96-98)

A continuación, en el Gráfico 7, se representan los flujos de agua recuperada del caso base junto a los flujos de agua recuperada obtenida realizando la variación de la tasa de evaporación real en +1[mm/día] y -1[mm/día].



*Gráfico 7: Flujo de agua recuperada en [l/s] para análisis de sensibilidad*

En el gráfico, se observa una tendencia de más flujo de agua recuperada en los meses de más frío (Mayo, Junio, Julio y Agosto) y una recuperación menor en los meses donde la evaporación es mayor (de Septiembre a Marzo). Esta tendencia es observada en los tres casos.

También se observa que la variación de la tasa de evaporación, tanto positiva como negativa, entrega curvas que siguen el mismo comportamiento del caso base pero con un desfase tanto positivo como negativo.

A la vez, se tiene que para el caso de una variación en +1[mm/día] en la tasa de evaporación, se tiene una recuperación promedio de 726 [l/s] y en el caso de una variación en -1[mm/día] en la tasa de evaporación, se tiene una recuperación promedio de 880[l/s]. De acuerdo al caso

## 8. Análisis de Costos Asociados

base, que promediando lo obtenido mensual durante el año analizado se tiene un flujo de agua recuperada de 803[l/s], por lo que una variación de +/1 [mm/día], representa una variación en el flujo de agua recuperada de +/- 77[l/s] lo que significa una variación del +/-10% en el flujo de agua recuperada del caso base. (Anexo E, página 99)

Básicamente, lo que se busca obtener con el análisis de sensibilidad, es el costo implicado con la variación de la tasa de evaporación. En este caso se tiene que una variación de +/-1[mm/día] la cual genera un cambio del 10% en la respuesta, es decir, basta tener una imprecisión en la medición de la tasa de evaporación de +/-1[mm/día] para obtener un flujo de agua recuperada 10% mayor o menor.

Por lo tanto, la pregunta es ¿cómo será el efecto en el costo total de consumo de agua por un cambio en el flujo de un +/-10%? Si los 77[l/s] representan un cambio en el flujo de agua recuperada del 10%, y el agua recuperada representa aproximadamente un 30% en el total del flujo de agua ocupada por las plantas, en el caso de mayor recuperación, los 777[l/s] representan un 33% del total del agua ocupada por plantas y en el caso de menor recuperación, los 623[l/s] representan un 27% del total del consumo de agua por plantas. Desde el Gráfico 3, de variación de costos v/s porcentaje de recuperación del capítulo IV, se obtiene el efecto de la variación por sensibilidad el cual se representa en el Gráfico 8.

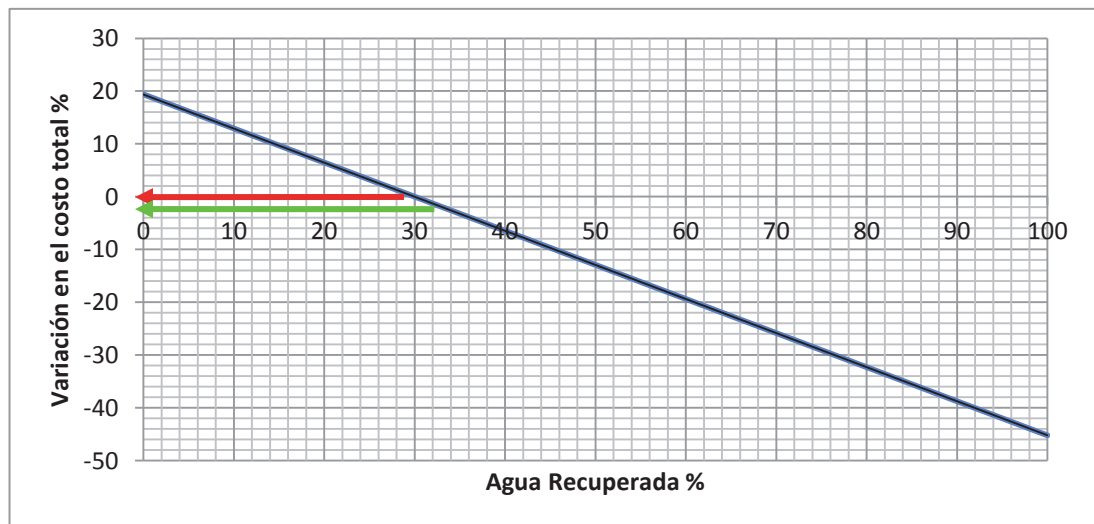


Gráfico 8: Efecto en el costo de consumo de agua por la sensibilidad

## 8. Análisis de Costos Asociados

---

Por lo tanto, según el Gráfico 8, el efecto en el costo en cada caso es:

- El tener un 10% más de flujo de recuperación se traduce en aproximadamente un 2% menos de costo, es decir, considerando el costo de consumo de agua diario de US\$192.000, significa alrededor de US\$3.800 de ahorro diario. En el Gráfico 8, se representa el efecto con una línea color verde.
- En el caso de tener un 10% menos de flujo de recuperación, la situación es desfavorable, y se traduce en un 2% más de costo de consumo de agua diario por las plantas, lo que se traduce en aproximadamente US\$3.800 más de gastos diarios. En el Gráfico 8, se representa el efecto con una línea color roja.

Una variación en los costos de +/-2%, no es tan significativo si se considera que el 30% que representa el agua recuperada del agua total es una tendencia y no un valor fijo, sin embargo cualquier ahorro es beneficioso, por lo que manejar el tema de las pérdidas por evaporación con datos reales va a permitir tener un modelo más preciso, con proyecciones que no ocasionen gastos innecesarios.



## 8.2 Costos Asociados a las Proyecciones

Considerando los datos representados en el Gráfico 6, en los cuales se evidencian diferencias entre la curva del modelo y la curva real, se analizan los costos asociados a estas diferencias, para esto es necesario conocer el intervalo de confianza en que se mueve la curva real.

### 8.1.1 Intervalo de confianza

A continuación se realiza el cálculo del intervalo de confianza, el cual entregará el rango de flujo de agua recuperada respecto a la curva real se trabaja con los datos presentados en el Gráfico 6. (Anexo D, página 94)

Se tiene que el intervalo de confianza se define por la siguiente ecuación:

$$IC = \bar{x} \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1.21)$$

Donde,  $\bar{x}$  es la media muestral,  $s$  es la desviación estándar muestral,  $n$  es el tamaño de la muestra y  $t_{\alpha/2; n-1}$  es el estadístico “t-Student”, que se obtiene desde las tabla de distribución de  $t$  (Anexo F, página 100).

Nivel de confianza: 99% ( $\alpha=0,01$ )

Media:  $\bar{x} = 700$  [l/s]

Desviación estándar:  $s=100$  [l/s]

Tamaño muestra:  $n=12$

$t_{0,005; 11}=2,718$

Por lo tanto el intervalo de confianza obtenido para la curva real es:

$$IC = 700 \pm 2,718 \cdot \frac{100}{\sqrt{12}}$$

$$IC = [622 ; 779] (l/s)$$

### 8.1.2 Cálculo de costos asociados

A continuación, en el Gráfico 9, se representa el intervalo de confianza junto a las curvas, real y del modelo, de agua recuperada en [l/s].

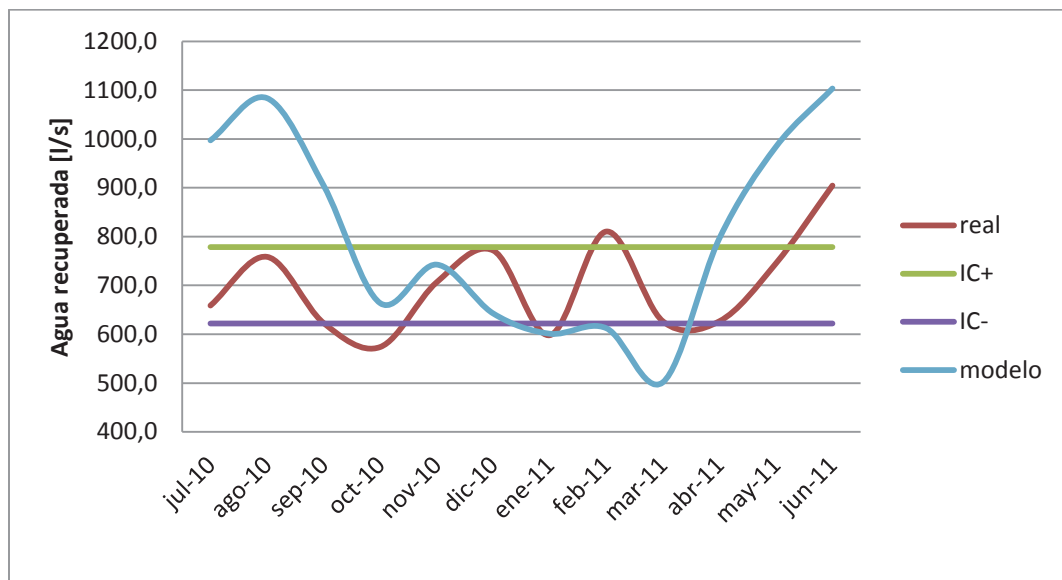


Gráfico 9: Agua recuperada [l/s] del FY11 junto al intervalo de confianza

En el gráfico es posible visualizar los momentos que la curva entregada por el modelo se encuentra dentro del intervalo de confianza. Esto ocurre en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre, es decir, tres de los doce meses comprendidos. A la vez, en los meses que se encuentran sobre el intervalo de confianza, es decir superan los 779[l/s], el modelo entrega una recuperación promedio de 978[l/s], y en los que están bajo los 622[l/s], el modelo entrega una recuperación promedio de 572 [l/s].

## 8. Análisis de Costos Asociados

Estas variaciones de agua recuperada, se traducen en un costo en el consumo de agua. En otras palabras, el flujo que se está entregando fuera del intervalo de confianza produce una utilización de otras fuentes de aguas de mayor costo. Este costo sólo puede ser calculado en casos reales, por lo tanto se puede tener sólo el cálculo de años anteriores, debido a que es necesario conocer las proyecciones realizadas para ese mismo año y así saber si las proyecciones se movieron o no dentro del intervalo de confianza del año en análisis.

El costo implicado mes a mes por el flujo de agua recuperada proyectado fuera del intervalo de confianza en el FY11 se presenta en la Tabla 11:

*Tabla 11: Cálculo del costo de consumo de agua fuera del Intervalo de Confianza*

Mes	días	Flujo caso base [l/s]	Flujo real [l/s]	Diferencia fuera del IC* en [m <sup>3</sup> /mes]	Diferencia fuera del IC* en [US\$/mes]	Agua Fresca US\$/mes	Agua Desalinizada US\$/mes
jul-10	31	997	659	584.522	257.190	356.558	2.396.540
ago-10	31	1.084	759	816.085	359.077	497.812	3.345.947
sep-10	30	905	623	326.663	143.732	199.264	1.339.319
oct-10	31	664	574	0	0	0	0
nov-10	30	743	706	0	0	0	0
dic-10	31	643	772	0	0	0	0
ene-11	31	601	598	56.146	24.704	34.249	230.198
feb-11	28	612	810	23.244	10.227	14.179	95.299
mar-11	31	502	627	322.728	142.000	196.864	1.323.184
abr-11	30	796	627	44.816	19.719	27.338	183.745
may-11	31	984	745	549.173	241.636	334.996	2.251.610
jun-11	30	1.103	905	840.996	370.038	513.007	3.448.083

\*IC=Intervalo de Confianza

Según lo calculado en el Capítulo 4, el costo de consumo de agua diario es de US\$192.000, lo que implica un costo de consumo de agua anual de US\$70.080.000. Por lo tanto, considerando la utilización de otras fuentes de agua se tiene que el costo adicional de consumo, en caso de utilizar agua fresca, es de US\$2.174.267 al año, lo que representa un aumento del 3,10% en el total del costo de consumo de agua. En el caso de utilizar agua desalinizada, el costo aumenta

## 8. Análisis de Costos Asociados

---

a US\$14.613.925 al año, lo que representa un aumento del 20,85% en el total del costo de consumo de agua.

## CONCLUSIONES

El agua recuperada desde el Tranque Laguna Seca es una buena fuente de agua debido a su fácil disponibilidad y bajo costo, tomando una gran importancia para el proceso de Minera Escondida Limitada, donde el recurso hídrico es crítico debido a encontrarse ubicada en una zona árida, exactamente en el desierto de Atacama a 170 [km] de Antofagasta.

Al analizar la influencia del agua recuperada en el costo de consumo total, se tiene una favorable relación, donde un aumento en el agua recuperada permite reducir el costo de consumo total de agua, el que actualmente es de 192.000 [US\$/día], considerando que el mayor consumo de agua de entrada a los procesos de las plantas concentradoras es de agua fresca con un 63%, seguido por el agua recuperada con un 30% y sólo un 7% es de agua desalinizada. Al comparar el costo de la fuente de agua fresca (0,61 US\$/m<sup>3</sup>) con el costo de agua recuperada (0,41 US\$/m<sup>3</sup>) se observa que no existe una gran diferencia, sin embargo la extracción de agua fresca se ve limitada por normativas ambientales que resguardan la biodiversidad de la zona, haciendo cada más difícil mantener el agua suministrada por esta fuente, debido a que con el tiempo disminuyen las probabilidades de encontrar nuevos pozos de extracción (los pozos actuales consideran una disponibilidad de agua hasta el año 2018), por lo que es importante contar con un plan, de aquí al 2018, que permita sustituir esta fuente de agua.

El alto valor del agua desalinizada (4,1 US\$/m<sup>3</sup>) frente al agua recuperada, hace que esta última fuente de agua sea la candidata para sustituir en gran parte el suministro de agua fresca, por lo que es importante poder tener un buen manejo del agua recuperada. Frente a esta situación, es fundamental conocer el comportamiento hídrico del tranque Laguna Seca, con el fin de manejar aquellas variables que permitan aumentar la recuperación de agua, para esto se analizó el “Modelo del balance de aguas del Tranque de relaves Laguna Seca”, conjunto de

## Conclusiones

---

ecuaciones desarrolladas por la empresa asesora Arcadis, que buscan representar el comportamiento hídrico del tranque y obtener las proyecciones de agua recuperada de Minera Escondida.

No se tiene conocimiento de cómo se ha comportado este modelo en el tiempo, respecto a las proyecciones entregadas, por lo que se realizó un análisis estadístico de datos pareados de t de Student. Este análisis muestra una diferencia significativa entre las proyecciones entregadas por el modelo y los datos reales, tanto de forma anual como mensual. Debido a la imprecisión del modelo, se efectuó un estudio del modelo de forma general, para así tener conocimiento de los puntos que podrían estar causando estas diferencias y proponer mejoras.

Respecto a las principales oportunidades encontradas en el modelo, se destacan las siguientes propuestas de mejoras: enfocar el modelo a la optimización de la operación del tranque, encontrar el volumen mínimo de la laguna para así conocer el stock de agua disponible a recuperar desde la laguna, considerar la variación de volumen de la laguna en el tiempo y mejorar la medición de la tasa de evaporación en las playas activas y en la laguna utilizando tecnología satelital. Esta última mejora, va dirigida al cálculo de la pérdida por evaporación, considerando que la tasa de evaporación utilizada es la misma tanto para la evaporación en la laguna como en las playas y en vista que esta pérdida es una de las más influyente, llegando a alcanzar un 45% del total de las pérdida en el FY11.

Respecto a los costos asociados a las imprecisiones del modelo, el análisis de sensibilidad realizado al modelo, entrega que frente a una variación de la tasa de evaporación de +/- 1[mm/día] la variación del flujo de agua recuperada es de +/-10% , generando en el peor de los casos, un aumento del 2% del costo total de consumo de agua (3.800 US\$/día), y en el mejor de los casos un ahorro del 2% (3.800 US\$/día). Por otro lado, el costo asociado a las proyecciones poco precisas, se traduce en gastos extras por utilización de otras fuentes de agua en reemplazo del agua recuperada, en el caso del uso de agua fresca se tiene un aumento del costo de consumo en un 3,10% y en el caso más crítico de reemplazar con agua desalinizada,

## Conclusiones

---

se genera un aumento del 20,85% en el costo de consumo, lo que significan US\$14.000.000 anuales.

Por lo tanto, frente a los costos mencionados, la posibilidad de implementar las mejoras al modelo del balance de aguas es completamente factible, ya que van asociadas a aprovechar herramientas disponibles en Minera Escondida para abaratar costos. Si se considera el caso de la evaporación y la mejora en la precisión de la tasa de evaporación, se aprovecha la tecnología satelital disponible en MEL, por lo que para la implementación de mejoras solo se debe considerar como costo adicional el procesamiento de las imágenes satelitales y de la implementación del Modelo SEBAL, lo que se traduce en un costo mensual de US\$4.000, en el caso de los evaporímetros se tiene un costo de instalación cercano a los US\$10.000 y un costo de mantención mensual de US\$1.500, lo que es perfectamente rentable si se compara con el 2% (US\$3.800 diarios) de ahorro que se tiene al mejorar la precisión de la tasa de evaporación.

## GLOSARIO

Agua contenida en los relaves: es la cantidad de agua que ingresa con los relaves expresada en toneladas por día.

Concentración en peso de sólidos: es la fracción de sólidos contenida en el relave, considerada en peso.

Dique: estructura de material a la cual está asociada el punto de bombeo de agua.

Espejo de agua: superficie de la laguna.

Índice de vacío: es la relación entre el volumen de vacío y el volumen de sólidos.

Lagunas parásitas: zonas de agua clara dentro del tranque que no están unidas a la laguna central.

Muro: zona estructurada artificialmente para complementar perímetro natural que presenta la geografía.

Peso Específico Sólidos: es el peso específico del mineral contenido en el relave.

Playa activa: zona de depositación actual de los relaves y por tanto es el relave con mayor cantidad de agua.

Playa inactiva: zona en la que actualmente no se deposita relave. Contiene menos agua a causa de la consolidación y evaporación.

Producción de Relave: es la cantidad total de relave (agua y mineral) en peso que se descarga.



Relave consolidado: relave depositado que ha asentado, perdiendo parte importante del agua que contenía.

Retención: es la fracción del volumen de vacíos en que el material sólido depositado retiene agua.

Sector: agrupación de spigot secuenciales que descargan relave simultáneamente.

Spigot: cada una de los puntos de descarga perimetral.

Tranque de relaves: depósito de relaves.

Dren: sistema utilizado para deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro de contención. Este sistema, generalmente, se construye en la base del muro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Pinto, M., Barrera, S., Tailings Impoundments – Water Balance – Methodology, en WIM 2008, pág 221-232, Ed. Jaques Wiertz, Santiago, Chile, (2008).
- Pinto, M., Barrera, S., Tailings Impoundments – Water Balance – Key Variables , en WIM 2008, pág 233-241, Ed. Jaques Wiertz, Santiago, Chile, (2008).
- García, F., Modelo del Balance Hídrico del Tranque de Relaves Ovejería, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad De Chile, Santiago, Chile, (2007).
- “Modelo Balance de Aguas Tranque Laguna Seca”, Arcadis, Santiago, Chile, (2006).
- “Calibración del modelo balance de aguas”, Arcadis, Santiago, Chile, (2011).
- “Reglamento Depósitos Relaves 248”, Ministerio de Minería, Chile, (2009).
- Grandon, A., Determinación de Curvas de Evaporación desde la Napa en Diferentes Tipos de Suelos, Proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile, (2009).
- Ingelmo, F., Cuadrado, S. y Blanco de Pablos, A., Evaporación de agua en suelos de distinta textura. Anuario del Centro de Edafología y Biología Aplicada del CSIC- Vol. VI, pág 255-280, (1979).
- Nuñez, C., Modelación del flujo de calor del suelo y aplicación del algoritmo de cálculo de evapotranspiración mediante teledetección, Proyecto para optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, PUC, Santiago, Chile, (2009).

## ANEXOS

ANEXO A-1: Disponibilidad de agua en [l/s], FY07 - FY11 .....	90
ANEXO B-1: Balance General de Aguas Minera Escondida Limitada, FY09 .....	91
ANEXO C-1: Efecto de costo de producción variando porcentaje de agua recuperada para obtención de gráfico 3.....	92
ANEXO D-1: Proyecciones modelo Arcadis, FY08 – FY11 .....	93
ANEXO D-2: Datos Reales, FY08 – FY11 .....	94
ANEXO D-3: Diferencias para análisis estadístico mensual, FY11 .....	95
ANEXO D-4: Agua recuperada de [m <sup>3</sup> /mes] a [l/s], FY11 .....	97
ANEXO D-5: Pérdidas individuales obtenidas mediante modelo Arcadis, FY09-FY11 .....	98
ANEXO E-1: Agua recuperada sin variación en la tasa de evaporación, FY11 .....	99
ANEXO E-2: Sensibilidad +1[mm/día], FY11.....	100
ANEXO E-3: Sensibilidad -1[mm/día], FY11 .....	101
ANEXO E-4: Diferencia de flujos de agua recuperada obtenidos de análisis de sensibilidad respecto a caso base en [l/s], FY11 .....	102
ANEXO F-1: Tabla estadístico “t-Student” .....	103

ANEXO A-1: Disponibilidad de agua en [l/s], FY07 - FY11

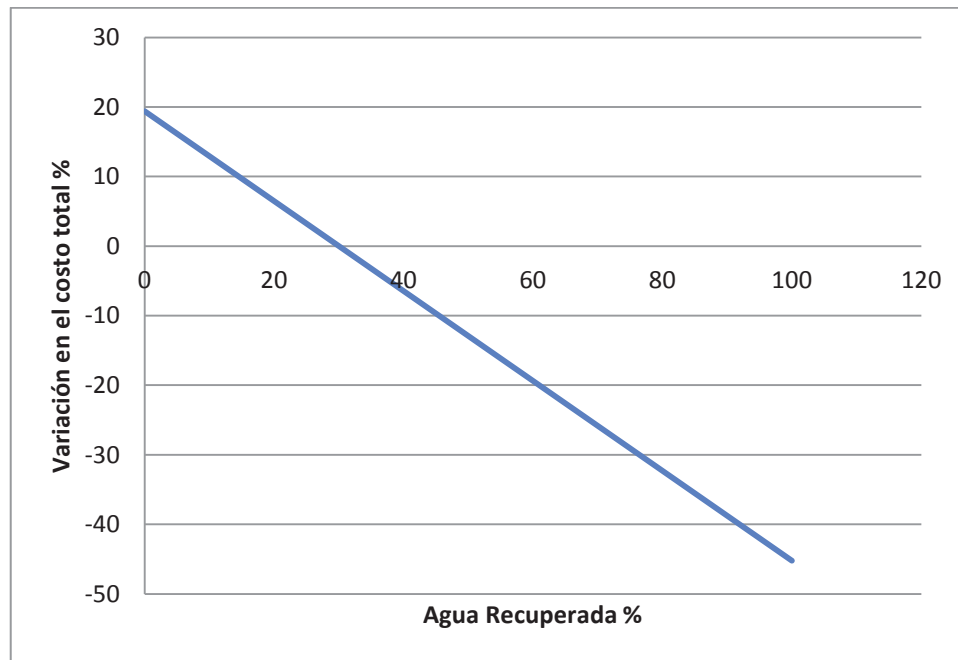
		FY07	FY08	FY09	FY10	FY11	Promedio	%
Punta Negra	l/s	293	293	293	293	495	333,4	10
Monturaqui	l/s	1400	1400	1400	1380	1400	1396	41
Hamburgo + Desagüe Mina	l/s	587	460	378	400	300	425,0	13
Planta Desalinizadora	l/s	500	500	500	500	500	500,0	15
Recuperada	l/s	628	799	744	745	700	723,2	21

## ANEXO B-1: Balance General de Aguas Minera Escondida Limitada, FY09

	Mes	jul-08	ago-08	sep-08	oct-08	nov-08	dic-08	ene-09	feb-09	mar-09	abr-09	may-09	jun-09
	Nº Dias	31	31	30	31	30	31	31	28	31	30	31	30
	Acumulativo	31	62	92	123	153	184	215	243	274	304	335	365
<b>Tonelajes Plantas</b>													
Mineral CLC	Ton/día	108.003	111.893	110.705	97.409	107.384	115.453	102.617	89.971	93.246	101.710	61.008	104.008
Mineral CLS	Ton/día	31	98.924	100.607	115.521	113.147	111.289	94.167	107.935	102.087	115.375	90.534	112.695
Mineral Plantas	Ton/día	108.035	210.818	211.312	212.930	220.531	226.742	196.784	197.907	195.333	217.085	151.542	216.703
<b>Relaves Plantas</b>													
Relaves CLC	Ton/día	104.255	108.025	107.082	93.901	103.905	111.625	99.424	87.014	90.214	98.603	121.922	117.584
Relaves CLS	Ton/día	30	95.268	97.205	111.196	109.010	107.340	91.019	104.258	98.851	111.534	116.951	115.617
Relaves Plantas Día	Ton/día	104.285	203.293	204.287	205.097	212.915	218.966	190.443	191.272	189.065	210.137	238.873	233.201
<b>Sólidos Espesadores</b>													
	Relación Alm LC/ alim total	1,000	0,531	0,524	0,457	0,487	0,509	0,521	0,455	0,477	0,469	0,403	0,480
	% sólidos relaves CLC	51,3%	49,9%	49,8%	49,7%	49,6%	49,6%	48,8%	47,3%	48,1%	49,2%	51,0%	51,0%
	% sólidos relaves CLS	0,3%	50,9%	52,3%	52,6%	53,3%	53,5%	53,4%	52,6%	51,6%	50,7%	51,0%	51,0%
		0,487	0,504	0,509	0,513	0,514	0,514	0,509	0,500	0,499	0,500	0,510	0,510
	% sólidos relaves CLS	0,3%	50,9%	52,3%	52,6%	53,3%	53,5%	53,4%	52,6%	51,6%	50,7%	51,0%	51,0%
		0,487	0,504	0,509	0,513	0,514	0,514	0,509	0,500	0,499	0,500	0,510	0,510
<b>Consumos Plantas m³/ton</b>													
Los Colorados	Agua Fresca	0,95	0,85	0,78	0,79	0,81	0,81	0,83	0,86	0,85	0,81	0,63	0,55
Los Colorados	Agua Recup.	0,00	0,16	0,23	0,23	0,20	0,21	0,22	0,25	0,23	0,22	0,33	0,41
Los Colorados (m³/ton)	Agua Total	0,95	1,00	1,01	1,01	1,02	1,01	1,05	1,12	1,08	1,03	0,96	0,96
Laguna Seca	Agua Fresca	356,14	0,45	0,46	0,55	0,45	0,45	0,47	0,48	0,53	0,56	0,57	0,50
Laguna Seca	Agua Recup.	0,00	0,52	0,45	0,35	0,42	0,42	0,40	0,42	0,40	0,41	0,39	0,46
Laguna Seca (m³/ton)	Agua Total	356,14	0,96	0,91	0,90	0,88	0,87	0,87	0,90	0,94	0,97	0,96	0,96
<b>Factores Totales de Consumos Concentradoras (m³/ton)</b>	Agua Fresca	1,04	0,65	0,62	0,65	0,63	0,63	0,66	0,65	0,69	0,68	0,60	0,53
	Agua Recup. Total	0,013	0,337	0,347	0,305	0,316	0,312	0,307	0,347	0,320	0,322	0,364	0,433
	Total	1,05	0,99	0,96	0,95	0,94	0,94	0,96	1,00	1,01	1,00	0,96	0,96
	m³/ton acum Total	0,01	0,23	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32
	Agua de Tranque	0,000	0,325	0,335	0,293	0,303	0,298	0,293	0,333	0,306	0,310	0,347	0,421
	Agua Recup. Acum. Tranque	0,000	0,215	0,262	0,271	0,278	0,282	0,283	0,289	0,291	0,293	0,297	0,308
	Efluente	0,013	0,011	0,013	0,013	0,014	0,014	0,015	0,014	0,013	0,012	0,017	0,012

ANEXO C-1: Efecto de costo de producción variando porcentaje de agua recuperada para obtención de gráfico 3

	Agua Recuperada	Costo agua [US\$/ton]	Costo producción [US\$/día]	Variación costo agua %
0	0	1,0	230160	19
10	0,1	0,9	217704	13
20	0,2	0,9	205248	6
30	0,3	0,8	192792	0
40	0,4	0,8	180336	-6
50	0,5	0,7	167880	-13
60	0,6	0,6	155424	-19
70	0,7	0,6	142968	-26
80	0,8	0,5	130512	-32
90	0,9	0,5	118056	-39
100	1	0,4	105600	-45



ANEXO D-1: Proyecciones modelo Arcadis, FY08 – FY11

Proyecciones		Toneladas Alimentadas a CLC	Toneladas Alimentadas a CLS	Total Tonelaje Plantas CLC+CLS	% Sólidos CLC	% Sólidos CLS	Agua en relaves CLC	Agua en relaves CLS	Agua Alimentada a Tranque	Agua Recuperada desde Tranque	Pérdidas Agua
Año	Mes	Toneladas	Toneladas	Toneladas	%	%	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2008	jul-07	3706250	3525430	7231680	0,505	0,526	3487545	3049832	6537377	2232781	4304595
	ago-07	3701118	3530562	7231680	0,505	0,526	3482715	3054272	6536987	2232781	4304206
	sep-07	3536165	3373893	6910058	0,505	0,526	3327496	2918739	6246235	1838723	4407511
	oct-07	3698406	3533274	7231680	0,505	0,526	3480163	3056618	6536781	1513003	5023778
	nov-07	3394568	3437022	6831590	0,505	0,526	3194255	2973351	6167606	1082380	5085226
	dic-07	3680060	3375354	7055415	0,505	0,526	3462900	2920002	6382903	759559,5	5623343
	ene-08	3684639	3547041	7231680	0,505	0,526	3467209	3068527	6535736	616952,7	5918784
	feb-08	3049729	2931071	5980800	0,505	0,526	2869765	2535655	5405420	510237	4895183
	mar-08	3693361	3538319	7231680	0,505	0,526	3475416	3060982	6536398	940118,4	5596280
	abr-08	3568992	3429408	6998400	0,505	0,526	3358386	2966764	6325150	1407335	4917816
	may-08	3693845	3537835	7231680	0,505	0,526	3475872	3060563	6536435	1924305	4612130
	jun-08	3569252	3429148	6998400	0,505	0,526	3358631	2966539	6325170	2160756	4164414
2009	jul-08	3688271	3272568	6960839	0,51	0,53	3401888	2786005	6187893	2257400	3930493
	ago-08	4157287	4100173	8257460	0,51	0,53	3834486	3490562	7325048	2626698	4698350
	sep-08	3890539	3806759	7697298	0,51	0,53	3588450	3240773	6829223	2110599	4718624
	oct-08	3805631	3844280	7649912	0,51	0,53	3510135	3272716	6782851	1780899	5001951
	nov-08	3664348	3733202	7397550	0,51	0,53	3379822	3178153	6557975	1553486	5004489
	dic-08	3866856	3899773	7766629	0,51	0,53	3566606	3319958	6886564	1553326	5333238
	ene-09	3943491	3745435	7688926	0,51	0,53	3637290	3188567	6825857	1322495	5503362
	feb-09	3572543	3535662	7108205	0,51	0,53	3295145	3009983	6305128	956764,4	5348363
	mar-09	3929607	3791050	7720657	0,51	0,53	3624485	3227400	6851884	1479278	5372606
	abr-09	3632675	3788429	7421104	0,51	0,53	3350609	3225168	6575777	1967335	4608442
	may-09	3688215	3588097	7276312	0,51	0,53	3401836	3054621	6456457	2198901	4257556
	jun-09	3657864	3594080	7251944	0,51	0,53	3373842	3059715	6433557	2367760	4065797
2010	jul-09	3338195	0	3338195	0,51	0,51	3120763	-0,00452	3120763	772373	2348390
	ago-09	3195447	1448671	4644118	0,51	0,51	2973893	1345337	4319230	1269875	3049354
	sep-09	2756158	3151210	5907368	0,51	0,51	2571288	2934397	5505684	1487063	4018622
	oct-09	3368373	3466932	6835305	0,51	0,51	3140161	3226612	6366772	1512583	4854189
	nov-09	3561650	3495904	7057554	0,51	0,51	3326032	3256675	6582707	1360215	5222492
	dic-09	3645357	3540067	7185424	0,51	0,51	3404087	3299077	6703164	1158378	5544785
	ene-10	3597659	3119882	6717541	0,51	0,51	3348388	2897716	6246104	1052480	5193624
	feb-10	2380750	3358888	5739638	0,51	0,51	2212948	3115078	5328026	924498,5	4403527
	mar-10	3591650	3473727	7065378	0,51	0,51	3349017	3233119	6582136	1663250	4918886
	abr-10	3506843	3636285	7143128	0,51	0,51	3257480	3371306	6628786	2172560	4456226
	may-10	3904889	3752178	7657067	0,51	0,51	3631378	3483305	7114682	2690189	4424494
	jun-10	3630565	3575331	7205896	0,51	0,51	3389194	3332477	6721671	2736687	3984985
2011	jul-10	3649963	3288131	6938094	0,51	0,51	3384088	3048613	6432701	2183488	4249214
	ago-10	3886649	3873375	7760023	0,51	0,51	3603533	3591226	7194759	2183515	5011244
	sep-10	3485110	3780397	7265507	0,51	0,51	3231244	3505021	6736265	2111356	4624908
	oct-10	4010440	3863663	7874103	0,51	0,51	3718307	3582221	7300529	1774193	5526336
	nov-10	3843280	3174560	7017841	0,51	0,51	3563324	2943316	6506639	1649193	4857447
	dic-10	3987371	3842720	7830091	0,51	0,51	3696919	3562804	7259723	1636489	5623234
	ene-11	3635999	3216949	6852948	0,51	0,51	3371142	2982616	6353758	1636484	4717274
	feb-11	3380913	3276357	6657270	0,51	0,51	3134637	3037697	6172334	1477914	4694420
	mar-11	3245222	3654686	6899908	0,51	0,51	3008829	3388467	6397297	1703587	4693710
	abr-11	3459542	3305710	6765252	0,51	0,51	3207538	3064912	6272450	2111435	4161015
	may-11	3536342	3377620	6913962	0,51	0,51	3278743	3131584	6410327	2184121	4226207
	jun-11	3404382	3186952	6591334	0,51	0,51	3156396	2954805	6111200	2113116	3998085

### ANEXO D-2: Datos Reales, FY08 – FY11

Valores Reales		Total Alim		Total Alim	% Sólidos	% Sólidos	Relaves	Relaves CLS	Total Relaves	Agua en el	Agua Total	Pérdidas
Año	Mes	Alim a CLC	Alim a CLS	Plantas CLC+CLS	CLC	CLS	CLC		Plantas	relave al	Recup desde	Agua en TLS
		Ton	Ton	Ton	%	%	Ton	Ton	Ton	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2008	jul-07	3725256	3766548	7491804	0,4796506	0,52623158	3581846	3597176	7179022	6987971,62	2583150,4	4404821,22
	ago-07	4088697,38	3193771,35	7282468,73	0,49081276	0,5207945	3935661,78	3072421,79	7008083,56	6606987,4	2407251,4	4199736
	sep-07	3766941	3865196	7632137	0,51025466	0,53024468	3630220	3721001	7351221	6762986,73	2175393,8	4587592,93
	oct-07	3464349	3980356	7444705	0,46011068	0,52397482	3336360	3824804	7161164	6934178,56	1965862	4968316,56
	nov-07	3728770	2960786	6689556	0,49168281	0,51606569	3576724	2852491	6429215	6309344,14	1478159,7	4831184,44
	dic-07	3804193	3838831	7643024	0,48812249	0,51410454	3641413	3669393	7310806	6909071	1893065	5016006
	ene-08	3739211	2982149	6721360	0,47804234	0,51555418	3598897	2863771	6462668	6620481	1975092,9	4645388,1
	feb-08	3726187	3759766	7485953	0,49032219	0,52763337	3599001	3616275	7215276	6697904,14	1871620,4	4826283,74
	mar-08	3983549	3838017	7821566	0,48553502	0,51038906	3843481	3672490	7515971	7224617,13	1970794,6	5253822,53
	abr-08	3897656	3960450	7858106	0,5011013	0,51701936	3770398	3810112	7580510	7127133,98	1977891	5149242,98
	may-08	4233031	3979233	8212264	0,49042431	0,51820217	4095488	3842908	7938396	7320782,19	2273131,6	5047650,59
	jun-08	4226670	4193607	8420277	0,50936707	0,52784429	4058601	4028244	8086845	7323160,26	2639824,3	4683335,96
2009	jul-08	3642603,9	2840614,15	6483218,05	0,505	0,505	3524357,32	2744480,26	6268837,59	6120074,71	1825751,55	4371599,17
	ago-08	3571555,71	3360948,15	6932503,86	0,505	0,505	3463431,09	3261373,08	6724804,16	6247775,23	2418890,06	3874889,17
	sep-08	3860268,49	3139954,06	7000222,55	0,49598733	0,48433143	3739001,08	3044195,27	6783196,35	6621893,82	1814467,05	4827699,77
	oct-08	3745469,43	3694380,99	7439850,41	0,49220826	0,48624281	3638297,23	3593386,27	7231683,5	6611979,39	2062708,32	4634168,07
	nov-08	3840133,14	3454547,31	7294680,45	0,48960795	0,49172758	3736334,47	3363076,6	7099411,06	7265279,53	2019499,17	5337281,36
	dic-08	4023812,86	3757318,7	7781131,56	0,50230849	0,50931866	3923853,91	3659353,2	7583207,11	7144580,26	2066358,29	5112979,98
	ene-09	3998733,01	3694202,12	7692935,13	0,48649301	0,48920517	3901579,63	3606212,11	7507791,74	7558956,81	1971419,44	5658154,37
	feb-09	3527114,28	3295442,53	6822556,81	0,4944933	0,48899614	3451507,85	3218695,05	6670202,9	6891935,49	1733276,43	5158659,06
	mar-09	3813517,68	3052000,21	6865517,89	0,49084561	0,47428025	3724018,22	2970787,13	6694805,35	7119509,48	1267319,14	5852190,34
	abr-09	3236027,35	3435587,12	6671614,48	0,48342844	0,51763121	3147695,6	3336809,82	6484505,42	6472994,29	2131658,33	4341335,96
	may-09	3215076,49	3506209,18	6721285,67	0,5	0,5	3122512,82	3396884,69	6519397,51	6519397,51	2358824,45	4160573,06
	jun-09	3166885,81	3338331,53	6505217,34	0,5	0,51	3046415,96	3211406,44	6257822,4	6131884,89	1807036,31	4324848,58
2010	jul-09	3348101,25	970,773376	3349072,02	0,5127	0,0028	3231897,81	941,328261	3232839,14	3407031,62	0	3407031,62
	ago-09	3468686,07	3066657,97	6535344,04	0,499	0,5092	3348771,31	2953322,65	6302093,97	6208797,24	2127238,81	4081558,44
	sep-09	3321158,75	3018215,68	6339374,43	0,4976	0,5228	3212462,3	2916157,46	6128619,76	5905253,17	2120753,14	3784500,03
	oct-09	3019689,83	3581140,1	6600829,92	0,4971	0,5263	2910924,37	3447088,13	6358012,5	6047463,89	1932789	4114674,89
	nov-09	3221529,19	3394402,14	6615931,33	0,4959	0,533	3117157,27	3270297,45	6387454,72	6034046,35	2001747	4032299,35
	dic-09	3579040,02	3449948,94	7028988,96	0,4963	0,5346	3460384,17	3327550,77	6787934,94	6408803,69	2095000,15	4313803,54
	ene-10	3181135,53	2919161,96	6100297,5	0,4884	0,5343	3082147,46	2821594,35	5903741,82	5687879,17	1784669,07	3903210,1
	feb-10	2519201,18	3022183,71	5541384,89	0,4726	0,526	2436380,59	2919233,44	535614,04	5349529,41	1847237	3502292,41
	mar-10	2890628,48	3164688,25	6055316,73	0,4806	0,5163	2796642,8	3064380,17	5861022,97	5893312,89	1855309,57	4038003,32
	abr-10	3051298,41	3461237,36	6512535,77	0,4919	0,5068	2958094,87	3346012,84	6304107,72	6311737,8	2021760	4289977,8
	may-10	1891254,32	2806549,78	4697804,1	0,4469	0,4892	1822216,87	2707863,43	4530080,3	5082668,79	1631188,4	3451480,4
	jun-10	3120237,95	3380863,19	6501101,14	0,5075	0,5018	3013843,87	3260954,02	6274797,89	6162324,11	2068853,13	4093470,99
2011	jul-10	3182824,69	2989537,48	6172362,18	0,49	0,49	3092097,16	2901118,39	5993215,55	6235779,68	1764456,44	4471323,24
	ago-10	2958043,9	3686552,79	6644596,68	0,48	0,49	2880209,47	3565973,33	6446182,81	6829609,26	2031749,78	4797859,48
	sep-10	3317788,35	3562007,89	6879796,24	0,49	0,5	3217382,52	3450934,64	6668317,17	6797648,34	1615166,55	5182481,79
	oct-10	2626832,81	2747089,83	5373922,65	0,46	0,47	2547489,21	2653378,42	5200867,63	5980318,45	1536588,42	4443730,03
	nov-10	3183407,05	3231722,32	6415129,38	0,47	0,48	3086614,68	3125895,37	6212510,05	6864880,6	1830935	5033945,6
	dic-10	3320339,09	3679271,54	6999610,64	0,47	0,5	3221361,18	3553920,47	6775281,66	7184290,72	2066737	5117553,72
	ene-11	3085876,48	2674413,57	5760290,06	0,45	0,48	2998032,58	2591866,33	5589898,91	6469701,82	1601715	4867986,82
	feb-11	1900809	3214250	5115059	0,45	0,48	1842678	3116535	4959213	5626226,58	1960519,2	3665707,38
	mar-11	2872080	2245284	5117364	0,48	0,48	2760760	2175642	4936402	5345835,08	1678132,67	3667702,42
	abr-11	2789358,44	2407614,66	5196973,1	0,48	0,46	2693194,44	2347505,66	5040700,1	5671444,82	1623902	4047542,82
	may-11	3256890,86	2310299,04	5567189,9	0,463	0,472	3143957,17	2255220,37	5399177,54	6166916,32	1995628,77	4171287,55
	jun-11	2861464,45	2773635,7	5635100,16	0,47	0,47	2773445,72	2708300,42	5481746,14	6179288,2	2344654,11	3834634,08



## ANEXO D-3: Diferencias para análisis estadístico mensual, FY11

Agua Recuperada [m <sup>3</sup> ]		Agua Alimentada [m <sup>3</sup> ]		k		diferencia
real	modelo	real	modelo	real	modelo	d=r-m
2.583.150	2.232.781	6.987.972	6.537.377	0,370	0,342	0,028
2.407.251	2.232.781	6.606.987	6.536.987	0,364	0,342	0,023
2.175.394	1.838.723	6.762.987	6.246.235	0,322	0,294	0,027
1.965.862	1.513.003	6.934.179	6.536.781	0,284	0,231	0,052
1.478.160	1.082.380	6.309.344	6.167.606	0,234	0,175	0,059
1.893.065	759.559	6.909.071	6.382.903	0,274	0,119	0,155
1.975.093	616.953	6.620.481	6.535.736	0,298	0,094	0,204
1.871.620	510.237	6.697.904	5.405.420	0,279	0,094	0,185
1.970.795	940.118	7.224.617	6.536.398	0,273	0,144	0,129
1.977.891	1.407.335	7.127.134	6.325.150	0,278	0,222	0,055
2.273.132	1.924.305	7.320.782	6.536.435	0,311	0,294	0,016
2.639.824	2.160.756	7.323.160	6.325.170	0,360	0,342	0,019
2.076.644	2.257.400	6.120.075	6.187.893	0,339	0,365	-0,025
2.839.502	2.626.698	6.247.775	7.325.048	0,454	0,359	0,096
2.293.877	2.110.599	6.621.894	6.829.223	0,346	0,309	0,037
2.506.375	1.780.899	6.611.979	6.782.851	0,379	0,263	0,117
2.216.338	1.553.486	7.265.280	6.557.975	0,305	0,237	0,068
2.200.185	1.553.326	7.144.580	6.886.564	0,308	0,226	0,082
2.253.840	1.322.495	7.558.957	6.825.857	0,298	0,194	0,104
2.005.563	956.764	6.891.935	6.305.128	0,291	0,152	0,139
1.783.708	1.479.278	7.119.509	6.851.884	0,251	0,216	0,035
2.131.658	1.967.335	6.472.994	6.575.777	0,329	0,299	0,030
2.358.824	2.198.901	6.519.398	6.456.457	0,362	0,341	0,021
1.807.036	2.367.760	6.131.885	6.433.557	0,295	0,368	-0,073
2.127.239	1.269.875	6.208.797	4.319.230	0,343	0,294	0,049
2.120.753	1.487.063	5.905.253	5.505.684	0,359	0,270	0,089
1.932.789	1.512.583	6.047.464	6.366.772	0,320	0,238	0,082
2.001.747	1.360.215	6.034.046	6.582.707	0,332	0,207	0,125
2.095.000	1.158.378	6.408.804	6.703.164	0,327	0,173	0,154
1.784.669	1.052.480	5.687.879	6.246.104	0,314	0,169	0,145
1.847.237	924.499	5.349.529	5.328.026	0,345	0,174	0,172
1.855.310	1.663.250	5.893.313	6.582.136	0,315	0,253	0,062
2.021.760	2.172.560	6.311.738	6.628.786	0,320	0,328	-0,007

## Anexo D

---

1.631.188	2.690.189	5.082.669	7.114.682	0,321	0,378	-0,057
2.068.853	2.736.687	6.162.324	6.721.671	0,336	0,407	-0,071
1.764.456	2.183.488	6.235.780	6.432.701	0,283	0,339	-0,056
2.031.750	2.183.515	6.829.609	7.194.759	0,297	0,303	-0,006
1.615.167	2.111.356	6.797.648	6.736.265	0,238	0,313	-0,076
1.536.588	1.774.193	5.980.318	7.300.529	0,257	0,243	0,014
1.830.935	1.649.193	6.864.881	6.506.639	0,267	0,253	0,013
2.066.737	1.636.489	7.184.291	7.259.723	0,288	0,225	0,062
1.601.715	1.636.484	6.469.702	6.353.758	0,248	0,258	-0,010
1.960.519	1.477.914	5.626.227	6.172.334	0,348	0,239	0,109
1.678.133	1.703.587	5.345.835	6.397.297	0,314	0,266	0,048
1.623.902	2.111.435	5.671.445	6.272.450	0,286	0,337	-0,050
1.995.629	2.184.121	6.166.916	6.410.327	0,324	0,341	-0,017
2.344.654	2.113.116	6.179.288	6.111.200	0,379	0,346	0,034

ANEXO D-4: Agua recuperada de [m<sup>3</sup>/mes] a [l/s], FY11

Mes	Días	Modelo		Real	
		[m <sup>3</sup> /mes]	[l/s]	[m <sup>3</sup> /mes]	[l/s]
jul-10	31	2.670.996	997,2	1.764.456	658,8
ago-10	31	2.902.558	1083,7	2.031.750	758,6
sep-10	30	2.345.831	905,0	1.615.167	623,1
oct-10	31	1.778.144	663,9	1.536.588	573,7
nov-10	30	1.924.885	742,6	1.830.935	706,4
dic-10	31	1.720.993	642,5	2.066.737	771,6
ene-11	31	1.609.819	601,0	1.601.715	598,0
feb-11	28	1.481.499	612,4	1.960.519	810,4
mar-11	31	1.343.237	501,5	1.678.133	626,5
abr-11	30	2.063.984	796,3	1.623.902	626,5
may-11	31	2.635.647	984,0	1.995.629	745,1
jun-11	30	2.860.164	1103,5	2.344.654	904,6

ANEXO D-5: Pérdidas individuales obtenidas mediante modelo Arcadis, FY09-FY11

	<b>Retenido</b>	<b>Evaporación</b>	<b>Infiltración</b>	<b>Resaturación</b>	<b>Pérdidas totales</b>
	<b>m<sup>3</sup>/mes</b>	<b>m<sup>3</sup>/mes</b>	<b>m<sup>3</sup>/mes</b>	<b>m<sup>3</sup>/mes</b>	<b>m<sup>3</sup>/mes</b>
FY09	2.817.771	1.432.887	113.356	265.736	4.629.750
FY10	2.357.279	1.397.348	111.412	285.098	4.151.137
FY11	1.396.408	1.494.223	112.625	287.148	3.290.404
promedio	2.190.486	1.441.486	112.464	279.327	

	<b>Retención</b>	<b>Evaporación</b>	<b>Infiltración</b>	<b>Resaturación</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
	<b>modelo</b>	<b>modelo</b>	<b>modelo</b>	<b>modelo</b>
FY09	60,9	30,9	2,4	5,7
FY10	56,8	33,7	2,7	6,9
FY11	42,4	45,4	3,4	8,7
promedio %	53,4	36,7	2,9	7,1

## ANEXO E-1: Agua recuperada sin variación en la tasa de evaporación, FY11

Mes	Días	Tee (mm/día)	Tee (m/día)	Área laguna (m <sup>2</sup> )	Área playa activa (m <sup>2</sup> )	Evaporación laguna (m <sup>3</sup> /mes)	Evaporación playas (m <sup>3</sup> /mes)
jul-10	31	3,9	0,12	1.221.935	5.354.787	147.732	647.394
ago-10	31	4,6	0,14	1.220.649	5.545.995	174.065	790.859
sep-10	30	6,7	0,2	1.219.319	5.642.032	245.083	1.134.048
oct-10	31	8,4	0,26	1.218.281	5.262.451	317.240	1.370.342
nov-10	30	9,8	0,29	1.217.414	5.645.554	357.920	1.659.793
dic-10	31	10,7	0,33	1.217.157	5.710.011	403.731	1.894.011
ene-11	31	10,5	0,33	1.216.945	5.456.943	396.116	1.776.235
feb-11	28	9,4	0,26	1.216.757	5.400.198	320.251	1.421.332
mar-11	31	8,1	0,25	1.216.570	5.131.952	305.481	1.288.633
abr-11	30	6,1	0,18	1.216.379	5.303.179	222.597	970.482
may-11	31	4,8	0,15	1.216.175	5.409.352	180.967	804.912
jun-11	30	3,8	0,11	1.216.156	5.498.466	138.642	626.825

Mes	Agua en relave (m <sup>3</sup> /mes)	Pérdidas (m <sup>3</sup> /mes)					Recuperación (m <sup>3</sup> /mes)	Recuperación (l/s)
		Retenido	Infiltración laguna	Resaturación	Evaporación laguna	Evaporación playas		
jul-10	6.235.780	2.441.680	128.067	199.911	147.732	647.394	2.670.996	997
ago-10	6.829.609	2.626.223	127.933	207.972	174.065	790.859	2.902.558	1084
sep-10	6.797.648	2.716.722	123.671	232.293	245.083	1.134.048	2.345.831	905
oct-10	5.980.318	2.118.872	127.684	268.036	317.240	1.370.342	1.778.144	664
nov-10	6.864.881	2.531.023	123.478	267.783	357.920	1.659.793	1.924.885	743
dic-10	7.184.291	2.760.300	127.567	277.690	403.731	1.894.011	1.720.993	643
ene-11	6.469.702	2.277.366	127.544	282.622	396.116	1.776.235	1.609.819	601
feb-11	5.626.227	2.020.420	115.184	267.542	320.251	1.421.332	1.481.499	612
mar-11	5.347.769	2.011.127	127.505	271.786	305.481	1.288.633	1.343.237	502
abr-11	5.673.395	2.053.619	123.373	239.341	222.597	970.482	2.063.984	796
may-11	6.169.236	2.199.665	127.464	220.582	180.967	804.912	2.635.647	984
jun-11	6.181.544	2.233.304	123.350	199.259	138.642	626.825	2.860.164	1103

ANEXO E-2: Sensibilidad +1[mm/día], FY11

Mes	Días	Tee (mm/día)	Tee +1 (mm/día)	Tee (m/día)	Área laguna (m <sup>2</sup> )	Área playa activa (m <sup>2</sup> )	Evaporación laguna (m <sup>3</sup> /mes)	Evaporación playas (m <sup>3</sup> /mes)
jul-10	31	3,9	4,9	0,15	1.221.935	5.354.787	185.612	813.392
ago-10	31	4,6	5,6	0,17	1.220.649	5.545.995	211.905	962.785
sep-10	30	6,7	7,7	0,23	1.219.319	5.642.032	281.663	1.303.309
oct-10	31	8,4	9,4	0,29	1.218.281	5.262.451	355.007	1.533.478
nov-10	30	9,8	10,8	0,32	1.217.414	5.645.554	394.442	1.829.160
dic-10	31	10,7	11,7	0,36	1.217.157	5.710.011	441.463	2.071.021
ene-11	31	10,5	11,5	0,36	1.216.945	5.456.943	433.841	1.945.400
feb-11	28	9,4	10,4	0,29	1.216.757	5.400.198	354.320	1.572.538
mar-11	31	8,1	9,1	0,28	1.216.570	5.131.952	343.195	1.447.724
abr-11	30	6,1	7,1	0,21	1.216.379	5.303.179	259.089	1.129.577
may-11	31	4,8	5,8	0,18	1.216.175	5.409.352	218.668	972.602
jun-11	30	3,8	4,8	0,14	1.216.156	5.498.466	175.126	791.779

Mes	Agua en relave m <sup>3</sup> /mes	Pérdidas m <sup>3</sup> /mes					Recuperación m <sup>3</sup> /mes	Recuperación l/s
		Retenido	Infiltración laguna	Resaturación	Evaporación laguna (m <sup>3</sup> /mes)	Evaporación playas (m <sup>3</sup> /mes)		
jul-10	6.235.780	2.441.680	128.067	199.911	185.612	813.392	2.467.117	921
ago-10	6.829.609	2.626.223	127.933	207.972	211.905	962.785	2.692.792	1005
sep-10	6.797.648	2.716.722	123.671	232.293	281.663	1.303.309	2.139.991	826
oct-10	5.980.318	2.118.872	127.684	268.036	355.007	1.533.478	1.577.241	589
nov-10	6.864.881	2.531.023	123.478	267.783	394.442	1.829.160	1.718.996	663
dic-10	7.184.291	2.760.300	127.567	277.690	441.463	2.071.021	1.506.250	562
ene-11	6.469.702	2.277.366	127.544	282.622	433.841	1.945.400	1.402.928	524
feb-11	5.626.227	2.020.420	115.184	267.542	354.320	1.572.538	1.296.224	536
mar-11	5.347.769	2.011.127	127.505	271.786	343.195	1.447.724	1.146.433	428
abr-11	5.673.395	2.053.619	123.373	239.341	259.089	1.129.577	1.868.397	721
may-11	6.169.236	2.199.665	127.464	220.582	218.668	972.602	2.430.255	907
jun-11	6.181.544	2.233.304	123.350	199.259	175.126	791.779	2.658.725	1026

ANEXO E-3: Sensibilidad -1[mm/día], FY11

Mes	Días	Tee (mm/día)	Tee -1 (mm/día)	Tee (m/día)	Área laguna (m <sup>2</sup> )	Área playa activa (m <sup>2</sup> )	Evaporación laguna (m <sup>3</sup> /mes)	Evaporación playas (m <sup>3</sup> /mes)
jul-10	31	3,9	2,9	0,09	1.221.935	5.354.787	109.852	481.395
ago-10	31	4,6	3,6	0,11	1.220.649	5.545.995	136.224	618.933
sep-10	30	6,7	5,7	0,17	1.219.319	5.642.032	208.503	964.787
oct-10	31	8,4	7,4	0,23	1.218.281	5.262.451	279.474	1.207.206
nov-10	30	9,8	8,8	0,26	1.217.414	5.645.554	321.397	1.490.426
dic-10	31	10,7	9,7	0,3	1.217.157	5.710.011	365.999	1.717.000
ene-11	31	10,5	9,5	0,29	1.216.945	5.456.943	358.390	1.607.070
feb-11	28	9,4	8,4	0,24	1.216.757	5.400.198	286.181	1.270.126
mar-11	31	8,1	7,1	0,22	1.216.570	5.131.952	267.767	1.129.543
abr-11	30	6,1	5,1	0,15	1.216.379	5.303.179	186.106	811.386
may-11	31	4,8	3,8	0,12	1.216.175	5.409.352	143.265	637.222
jun-11	30	3,8	2,8	0,08	1.216.156	5.498.466	102.157	461.871

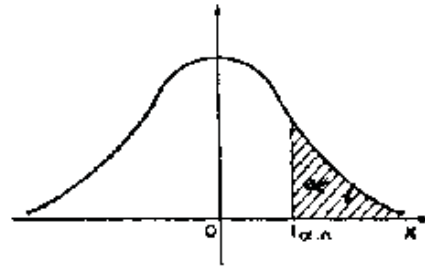
Mes	Agua en relave (m <sup>3</sup> /mes)	Pérdidas m <sup>3</sup> /mes					Recuperación (m <sup>3</sup> /mes)	Recuperación (l/s)
		Retenido	Infiltración laguna	Resaturación	Evaporación laguna (m <sup>3</sup> /mes)	Evaporación playas (m <sup>3</sup> /mes)		
jul-10	6.235.780	2.441.680	128.067	199.911	109.852	481.395	2.874.874	1073
ago-10	6.829.609	2.626.223	127.933	207.972	136.224	618.933	3.112.324	1162
sep-10	6.797.648	2.716.722	123.671	232.293	208.503	964.787	2.551.672	984
oct-10	5.980.318	2.118.872	127.684	268.036	279.474	1.207.206	1.979.046	739
nov-10	6.864.881	2.531.023	123.478	267.783	321.397	1.490.426	2.130.774	822
dic-10	7.184.291	2.760.300	127.567	277.690	365.999	1.717.000	1.935.735	723
ene-11	6.469.702	2.277.366	127.544	282.622	358.390	1.607.070	1.816.709	678
feb-11	5.626.227	2.020.420	115.184	267.542	286.181	1.270.126	1.666.773	689
mar-11	5.347.769	2.011.127	127.505	271.786	267.767	1.129.543	1.540.041	575
abr-11	5.673.395	2.053.619	123.373	239.341	186.106	811.386	2.259.571	872
may-11	6.169.236	2.199.665	127.464	220.582	143.265	637.222	2.841.038	1061
jun-11	6.181.544	2.233.304	123.350	199.259	102.157	461.871	3.061.603	1181

ANEXO E-4: Diferencia de flujos de agua recuperada obtenidos de análisis de sensibilidad respecto a caso base en [l/s], FY11

Mes	Caso base	Caso +1 [mm/día]	Caso -1 [mm/día]	Diferencia caso +1 con caso base	Diferencia caso -1 con caso base
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
jul-10	997	921	1073	-76	76
ago-10	1084	1005	1162	-78	78
sep-10	905	826	984	-79	79
oct-10	664	589	739	-75	75
nov-10	743	663	822	-79	79
dic-10	643	562	723	-80	80
ene-11	601	524	678	-77	77
feb-11	612	536	689	-77	77
mar-11	502	428	575	-73	73
abr-11	796	721	872	-75	75
may-11	984	907	1061	-77	77
jun-11	1103	1026	1181	-78	78



ANEXO F-1: Tabla estadístico “t-Student”



$\alpha/2$ gl	0,40	0,30	0,20	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,192	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,648	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,009	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415