

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

CÓDIGO ARCADIS: N° 5031-6040-RE-INF-0003

BALANCE DE AGUAS LA BREA

AGOSTO 2018

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre Firma	J. Loyola	P. Vargas	C. Díaz	Coordinación Interna
	Fecha	11.04.18	11.04.18	11.04.18	
B	Nombre Firma	J. Loyola	P. Vargas J. Lagos R. Herrena	C. Díaz	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	17.05.18	17.05.18	17.05.18	
C	Nombre Firma	J. Loyola	P. Vargas J. Lagos	C. Díaz	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	20.07.18	20.07.18	20.07.18	
O	Nombre Firma	J. Loyola	P. Vargas J. Lagos	C. Díaz	Aprobado Cliente
	Fecha	29.08.18	29.08.18	29.08.18	

Este documento NO ES APTO PARA CONSTRUCCIÓN.

CONTACTO

CAROLYN DÍAZ
Jefe de Proyecto

T +56 22 381 6143
e carolyn.diaz@arcadis.com

Arcadis.
Av. Antonio Varas 621
Providencia, CP 7500966
Santiago | Chile

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	4
2 REFERENCIAS	4
3 OBJETIVOS Y ALCANCES.....	5
4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO BALANCE DE AGUA	5
4.1 Definición del Modelo.....	5
4.2 Metodología para la Estimación de Flujos.....	6
4.2.1 Definiciones y Notaciones	6
4.2.2 Entradas de Agua	7
4.2.3 Pérdidas de Agua.....	8
4.2.4 Volumen de Control	10
4.3 Datos de Entrada	12
4.3.1 Características de los Relaves	12
4.3.2 Plan Minero	13
4.3.3 Datos Meteorológicos	14
4.3.4 Laguna Operacional	16
4.3.5 Recirculación de Agua	16
4.3.6 Esquema de Depositación	16
5 MODELO BALANCE DE AGUA PROYECTADO	18
5.1 Resultados	18
5.1.1 Entradas de agua.....	18
5.1.2 Pérdidas de Agua.....	19
5.1.3 Balance Cubeta – Depósito La Brea.....	21
5.2 Sensibilizaciones.....	24
5.2.1 Eventos Operacionales	24
5.2.2 Eventos Meteorológicos	25
6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	26

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4-1: Características de los relaves – Operación en Régimen [Ref. 1]	12
Tabla 4-2: Tasa de producción de relaves - operación en régimen [ktpd] [Ref. 4]	13
Tabla 5-1: Resumen de flujos mensuales – Pérdidas de agua	21
Tabla 5-2: variación de la densidad inicial de relaves depositados	12
Tabla 5-3: Resultados Balance de Aguas a nivel semestral (2019-2037) – Caso Base	23
Tabla 5-4: Datos de entrada sensibilización evento meteorológico.....	25
Tabla 5-5: Resultados flujos de agua recuperada – Eventos meteorológicos.....	25

LISTADO DE FIGURAS

Figura 4-1: Esquema gráfico de ancho de la playa húmeda “b”	9
Figura 4-2: Infiltraciones totales proyectadas – Depósito La Brea (2019-2037).....	10
Figura 4-3: Esquema de flujos considerados en el balance de aguas y volumen de control	11
Figura 4-4: Producción de Relaves (ktpd) [Ref. 4]	14
Figura 4-5: Tasa de evaporación diaria [Ref. 6].....	15
Figura 4-6: Estaciones pluviométricas DGA en el sector del depósito La Brea. [Ref. 2].....	15
Figura 4-7: Simulación de llenado del depósito – Año 2018.....	17
Figura 4-8: Simulación de llenado del depósito – Año 2037.....	18
Figura 5-1: Entradas de agua Depósito (2019-2037).....	19
Figura 5-2: Evolución en el tiempo de las salidas de agua en el tiempo (2019-2037)	20
Figura 5-3: Composición promedio de salidas de agua (2019-2037)	21
Figura 5-4: Resultados Balance de Aguas – Variación Densidad	22
Figura 5-5: Variación del flujo de recuperación de agua desde laguna.....	22
Figura 5-6: Flujo de agua recirculada y volumen de laguna	24

1 INTRODUCCIÓN

El yacimiento Caserones perteneciente a SCM Minera Lumina Copper Chile (SCMMLCC), posee actualmente una aprobación ambiental y sectorial para una capacidad de almacenamiento total de 1.036 millones de toneladas de relaves (RCA N°013/2010). La solución técnica, económica y ambiental de disposición de los relaves considera su disposición en dos depósitos separados: (i) un acopio de arenas (fracción gruesa) con una capacidad de almacenaje igual a 570 Mt aproximadamente ubicado inmediatamente aguas abajo de la Planta, en el sitio denominado quebrada Caserones Bajo, y (ii) un depósito de lamas (fracción fina) con una capacidad para almacenar aproximadamente 466 Mt ubicado en el sitio denominado quebrada La Brea.

Durante la operación del Depósito de Lamas La Brea se han producido desviaciones respecto al diseño original presentado en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), por lo que Caserones ha definido elaborar un nuevo estudio que incorpore los trabajos realizados para la caracterización de las componentes que presentaron un comportamiento diferente al estimado en el diseño original. Este estudio incluye además las modificaciones al diseño originadas por las desviaciones en la operación proyectada.

SCMMLCC ha solicitado a ARCADIS Chile Spa. (**Arcadis**) El desarrollo la “Ingeniería para EIA del Depósito de Lamas La Brea” para el periodo comprendido entre los años 2019 y 2037, incluyendo:

- Actualización del plan minero, Relación Arenas Lamas (RAL) del proyecto y la capacidad final del embalse.
- Actualización de la ingeniería del crecimiento.
- Análisis de estabilidad y deformaciones
- Actualización del modelo hidrogeológico
- Análisis de estabilidad para relaves espesados sobre lamas.
- Actualización de las obras de cierre.

El presente documento incluye un modelo de balance de agua a nivel mensual del Depósito de Relaves La Brea, durante la operación entre los años 2019 y 2037.

2 REFERENCIAS

- [Ref. 1] Criterio de Diseño Depósito lamas La Brea – Estudio de Factibilidad Manejo y Depositación de Relaves Proyecto Caserones (N° IBMR-CRT-664-CE-001), Arcadis 2009.
- [Ref. 2] Estudio Hidrológico, Ingeniería Para EIA Depósito De Lamas La Brea Caserones (N° 5031-6040-IH-MEC-003), Arcadis 2018.
- [Ref. 3] Estudio de Pendientes de Depositación, Consolidación y Asentamiento, Ingeniería Para EIA Depósito De Lamas La Brea Caserones (N° 5031-6040-RE-INF-001), Arcadis 2018.
- [Ref. 4] Planilla Excel, Plan Minero Largo Plazo Caserones, LOM 2018. Marzo 2018.
- [Ref. 5] Planilla Excel, Planilla Planificación 3 – Comprometido SERNAGEOMN ajustado, a septiembre del 2017. Marzo 2018.
- [Ref. 6] Planilla Excel, Balance de Aguas Global, RA Enero 2018, generado por operaciones Caserones, Marzo 2018.
- [Ref. 7] Memorándum Técnico “Resultados Ensayos de Laboratorio en Lamas Cajones 2 y 24” (4157-MMT-136), Arcadis, Junio 2017.
- [Ref. 8] Modelo de Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea Informe de Actualización / Recalibración a Dic 2017 y Simulación a Dic 2037 y Periodo de Cierre (5031-6640-GE-INF-0001), Ingeniería para EIA depósito de lamas La Brea Caserones, Agosto 2018.

3 OBJETIVOS Y ALCANCES

Este documento tiene por objetivo presentar los resultados del balance de aguas del Depósito de Lamas La Brea a nivel conceptual, proyectado entre los años 2019 y 2037, entregando como resultado los principales flujos medios involucrados dentro del volumen de control además de determinar el flujo de recirculación de aguas desde la laguna, con el objeto de mantener una laguna equilibrada y constante en el tiempo.

El alcance del documento es el siguiente:

- Descripción del modelo y metodología utilizada
- Identificar los principales flujos medios involucrados en el balance, tanto para las entradas, pérdidas y recuperación total del agua.
- Determinar el flujo de extracción de agua desde la laguna de clarificación (balsas).
- Realizar sensibilización para eventos operacionales y meteorológicos.

4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO BALANCE DE AGUA

4.1 Definición del Modelo

El balance de agua para un modelo superficial puede ser generado con las variaciones de volumen que se producen en la laguna de aguas claras. Un balance de aguas simplificado de un depósito muestra que la variación de este volumen de agua en la laguna de clarificación es función del agua que entra al depósito, el agua que se pierde en el sistema superficial y el volumen de agua que se recircula, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dt} = E - \Lambda - Rec$$

Donde:

- V: Volumen de laguna de depósito (m³).
 E: Entradas de agua al depósito en un periodo de tiempo determinado (m³/tiempo).
 Λ: Pérdidas de agua en el depósito en un periodo de tiempo determinado (m³/tiempo).
 Rec: Recuperación de agua desde el depósito (balsas) en un periodo de tiempo determinado (m³/tiempo).

Para este caso se asume que el balance de aguas se hace a volumen de laguna constante, por lo tanto la ecuación se simplifica a la siguiente:

$$Rec = E - \Lambda$$

Un observador ubicado fuera del depósito de relaves ve que a la laguna de clarificación ingresa agua proveniente del excedente del proceso de depositación y sedimentación, que se produce en la trayectoria del relave desde los puntos de descarga.

Además, observa que se producen pérdidas de agua por evaporación desde el espejo de agua y las playas húmedas de relave, por infiltración, principalmente por la zona de contacto directo de la laguna con el terreno natural, y que, como resultado del proceso de sedimentación, se pierde agua que queda atrapada en los intersticios del relave depositado.

4.2 Metodología para la Estimación de Flujos

En este capítulo se entrega la metodología del balance de aguas superficial del Depósito de Lamas La Brea. En primer lugar se entregan algunas definiciones de conceptos claves de la metodología, así como las diferentes notaciones empleadas. Luego se presentan las expresiones de cálculo de los diferentes flujos que intervienen en el balance, ya señalados en el acápite anterior, y las consideraciones adoptadas.

4.2.1 Definiciones y Notaciones

A continuación se definen conceptos claves empleados en la metodología de balance de agua desarrollado:

- **Área de laguna:** superficie del espejo de agua del área de manejo de la laguna de clarificación, ubicada en el sector del estribo sur.
- **Densidad del relave:** densidad aparente seca del relave depositado. Depende del peso específico de las partículas y del índice de vacíos. Según el uso de esta variable dentro del balance de agua puede corresponder a la densidad inicial de depositación (superficial) o bien a la densidad media de todo el relave acumulado.
- **Humedad de saturación:** contenido de agua que queda atrapado en los intersticios que dejan las partículas del relave, en el supuesto que todos los huecos están ocupados por agua. Corresponde a la proporción de agua sobre el peso seco de sólidos.
- **Infiltraciones perdidas:** agua del depósito que ingresa a través del subsuelo y que no logra ser captada para la operación).
- **Playa húmeda:** sector de la cubeta de relaves que permanece húmeda en superficie debido a que se está depositando relave.
- **Pérdida por evaporación:** agua que se pierde por evaporación desde el depósito de relaves. Las fuentes más importantes corresponden a evaporación desde la laguna de clarificación y a evaporación desde las playas húmedas.
- **Pérdida por retención en el relave:** agua que queda atrapada en los intersticios del relave, la cual no puede recuperarse en el corto plazo.

Se utilizan en el presente informe las siguientes notaciones, las cuales son mencionadas de nuevo a medida que vayan siendo utilizadas:

A	: Agua contenida en los relaves depositados (m^3/mes)
P_P	: Producción de relaves desde la planta de procesos (t/mes)
C_p	: Concentración en peso del relave desde la planta
T_{EE}	: Tasa de evaporación media mensual en sector depósito (mm/mes)
Ω_{LAG}	: Superficie de la laguna (m^2)
Ω_{CUB}	: Superficie de la cubeta del depósito de relaves (m^2)
Ω_{HUM}	: Superficie húmeda de los relaves depositados (m^2)
Ω	: Superficie húmeda de 1 playa de relave (m^2)
b_{PLAYA}	: Ancho playa húmeda de relave (m)
L	: Longitud de playa húmeda de relave (m)
Ψ	: Factor de ajuste, para ancho de playas húmedas
Q	: Caudal descargado en playa húmeda (m^3/s)
I	: Pendiente longitudinal de playa húmeda (m/m)
Z_{DESC}	: Elevación de inicio de playa, contacto relave - suelo natural ($msnm$)
Z_{LAG}	: Elevación de laguna ($m.s.n.m$)
Ω_{SAT}	: Superficie de la laguna en contacto con terreno natural (m^2)
C_j	: Agua por consolidación de relaves depositados en el mes "j" (m^3/mes)
P_{ACUMj}	: Producción de relave total acumulada en el mes "j" (t)
w_{SAT}^j	: Humedad de saturación en el mes "j"
w_{SA}	: Humedad de saturación inicial
γ_w	: Densidad del agua ($1 t/m^3$)
γ_d^j	: Densidad seca media de depositación del relave en el mes "j" (t/m^3)
G_s	: Peso específico relativo de sólido del relave
e_o	: Índice de vacíos inicial
Λ_{RET}	: Pérdida por retención de agua en el relave depositado (m^3/mes)
Λ_{HUM}	: Pérdida por evaporación desde superficies húmedas (m^3/mes)
Λ_{LAG}	: Pérdida por evaporación desde la superficie de la laguna (m^3/mes)
N	: Número de días del mes

4.2.2 Entradas de Agua

4.2.2.1 Agua que ingresa con los Relaves

Para el cálculo se considerará la concentración de los flujos de lamas y relaves directos que ingresan al depósito. Se utiliza la siguiente ecuación para determinar el volumen de agua que ingresa con los relaves, en m^3/mes .

$$A = P_{Pl} \times \frac{(1 - C_{Pl})}{C_{Pl}}$$

Donde:

A :	Agua contenida en los relaves de la planta de procesos (m^3/mes)
P_{Pl} :	Producción de relaves en la planta (t/mes)
C_{Pl} :	Concentración en peso del relave

Cabe señalar que en el presente balance de aguas, no se considera otro ingreso de agua al depósito ya sea por concepto de precipitaciones (ver sección 4.3.3), y consolidación de los relaves depositados.

4.2.3 Pérdidas de Agua

4.2.3.1 Pérdida por retención de agua en el relave depositado

La pérdida de agua por retención de los relaves depende de la densidad seca de depositación inicial del relave superficial y de la cantidad de relave depositado. Para este efecto, se considera que el relave, en la capa superior donde escurre (aproximadamente de un metro al mes), se encuentra saturado, por lo que la pérdida por este concepto, en m³/mes, se expresa de la siguiente manera.

$$\Lambda_{RET} = P_p \cdot w_{sat}$$

Con:

$$w_{sat} = \frac{e_o}{G_s} \quad \text{ó} \quad w_{sat} = \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s}$$

Donde:

- Λ_{RET} : Pérdida por retención de agua en el relave depositado (m³/mes)
- P_{PI} : Producción de relaves en la planta de procesos (t/mes)
- w_{SAT} : Humedad de saturación inicial
- e_o : Índice de vacíos inicial
- G_s : Gravedad específica del sólido del relave
- γ_d : Densidad seca de depositación inicial (t/m³)

Para la estimación del porcentaje de humedad de saturación inicial se puede obtener a partir del índice de vacíos (e_o), o a partir de la densidad seca de depositación inicial.

De acuerdo a los ensayos de sedimentación de lamas, proyectada a una duración de 30 días, la densidad seca inicial sedimentada se proyecta a un valor en torno a 1,14 m³/t, equivalente a un índice de vacíos de $e=1,5$, cuya humedad de saturación inicial es de $w=52\%$, valor adoptado para el balance de aguas proyectado. Esto se describe en la sección 4.3.1.

4.2.3.2 Pérdida por evaporación desde superficies húmedas (*)

Depende de los relaves depositados y las playas húmedas (activas) generadas a partir de esta última acción. La siguiente relación se utiliza para determinar la pérdida por evaporación en áreas húmedas, en m³/mes, destacándose que la tasa de evaporación considera un factor de embalse de 0,75.

$$\Lambda_{HUM} = T_{EE} \times \Omega_{HUM}$$

Donde:

- Λ_{HUM} : Pérdida por evaporación desde superficies húmedas (m³/mes)
- T_{EE} : Tasa de evaporación media mensual en sector del depósito (mm/mes)
- Ω_{HUM} : Superficie húmeda de los relaves depositados (m²)

En relación a la superficie húmeda de los relaves depositados, de acuerdo a la experiencia de Arcadis, la extensión de la playa húmeda de relave de una sola descarga, alcanza un valor límite que se estima con la expresión siguiente:

$$\Omega = b_{PLAYA} \times L$$

Con:

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

$$L = \frac{Z_{DESC} - Z_{LAG}}{i}$$

Donde:

Ω : Superficie húmeda de 1 playa de relave (m²)

b_{PLAYA} : Ancho playa húmeda de relave (m)

L : Longitud de playa húmeda de relave (m)

Ψ : Factor de ajuste, adoptado igual a 175 (valor empírico ajustado en otros depósitos similares)

Q : Caudal descargado en playa húmeda (m³/s)

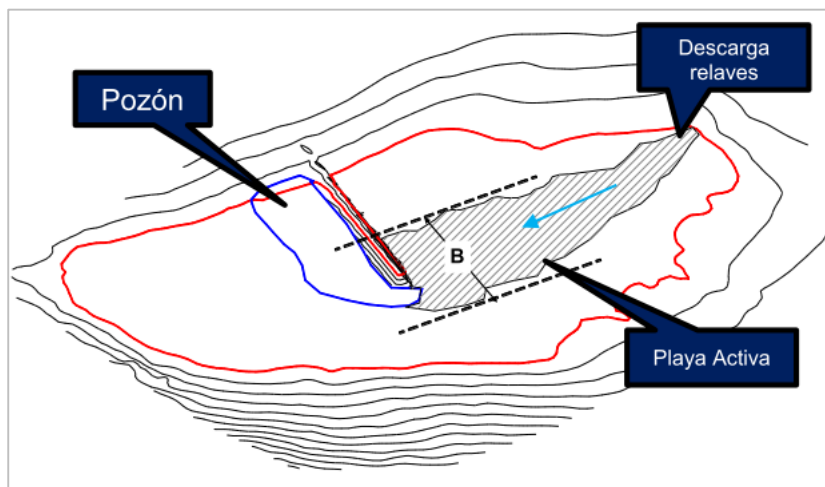
i : Pendiente longitudinal de playa húmeda (m/m), valor de 1,3%.

Z_{DESC} : Elevación de inicio de playa, contacto relave - suelo natural (m.s.n.m)

Z_{LAG} : Elevación de laguna (m.s.n.m)

La expresión del ancho de la playa “bPLAYA” fue desarrollada por ACL, 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, tal como se muestra en la figura esquemática siguiente.

Figura 4-1: Esquema gráfico de ancho de la playa húmeda “b”



Finalmente, la superficie húmeda total de los relaves depositados se obtiene mediante la suma de las áreas húmedas de cada una de las “k” playas (descargas) activas del depósito:

$$\Omega_{HUM} = \Psi \times \sum_{i=1}^K \left(\frac{Q_K}{\sqrt{i}} \right)^{3/8} \cdot L_K (*)$$

(*): "Tailings Impoundments – Water Balance methodology", artículo publicado por M. Pinto y S. Barrera, ARCADIS Geotecnica, Chile en "International Congress on Water Management in the Mining Industry – WIM2008", 9-11 de julio de 2008.

4.2.3.3 Pérdida por evaporación desde la superficie de la Laguna

La siguiente relación se utiliza para determinar la pérdida por evaporación desde el área de manejo de bajo sólido, en m³/mes, destacándose que la tasa de evaporación considera un factor de embalse de 0,75.

$$\Lambda_{LAG} = T_{EE} \cdot \Omega_{LAG}$$

Donde:

Λ_{LAG} : Pérdida por evaporación desde la superficie del agua en el área de manejo de bajo sólidos (m³/mes)

T_{EE} : Tasa de evaporación media mensual en sector depósito (mm/mes)

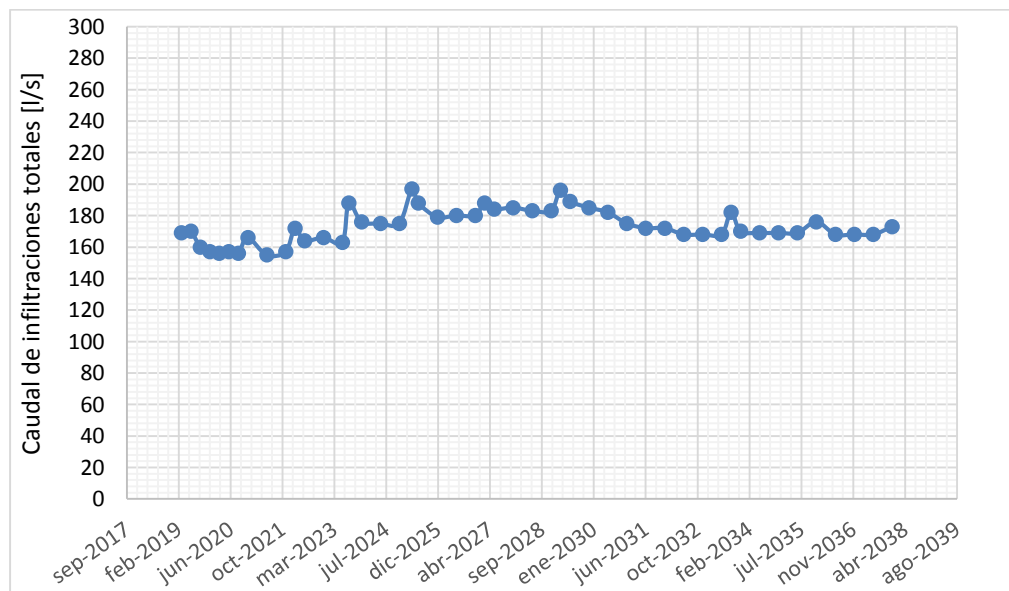
Ω_{LAG} : Superficie de laguna (m²)

4.2.3.4 Pérdidas por Infiltración

Para la estimación de pérdidas por infiltración en la calibración del modelo, se utilizaron como antecedentes los resultados del modelo recalibrado y proyectado para el Proyecto EIA, realizado por Arcadis Chile en el año 2018 [Ref. 8].

En tanto para las infiltraciones en el balance proyectado se usarán los resultados obtenidos del modelo de infiltraciones del Depósito de Lamas La Brea que son ingresados como vector variable en el tiempo dentro del modelo, reflejando en forma indirecta el efecto de la consolidación de las lamas en un mediano y largo plazo, que fue desarrollado en la presente ingeniería y es mostrado en la Figura 4-2.

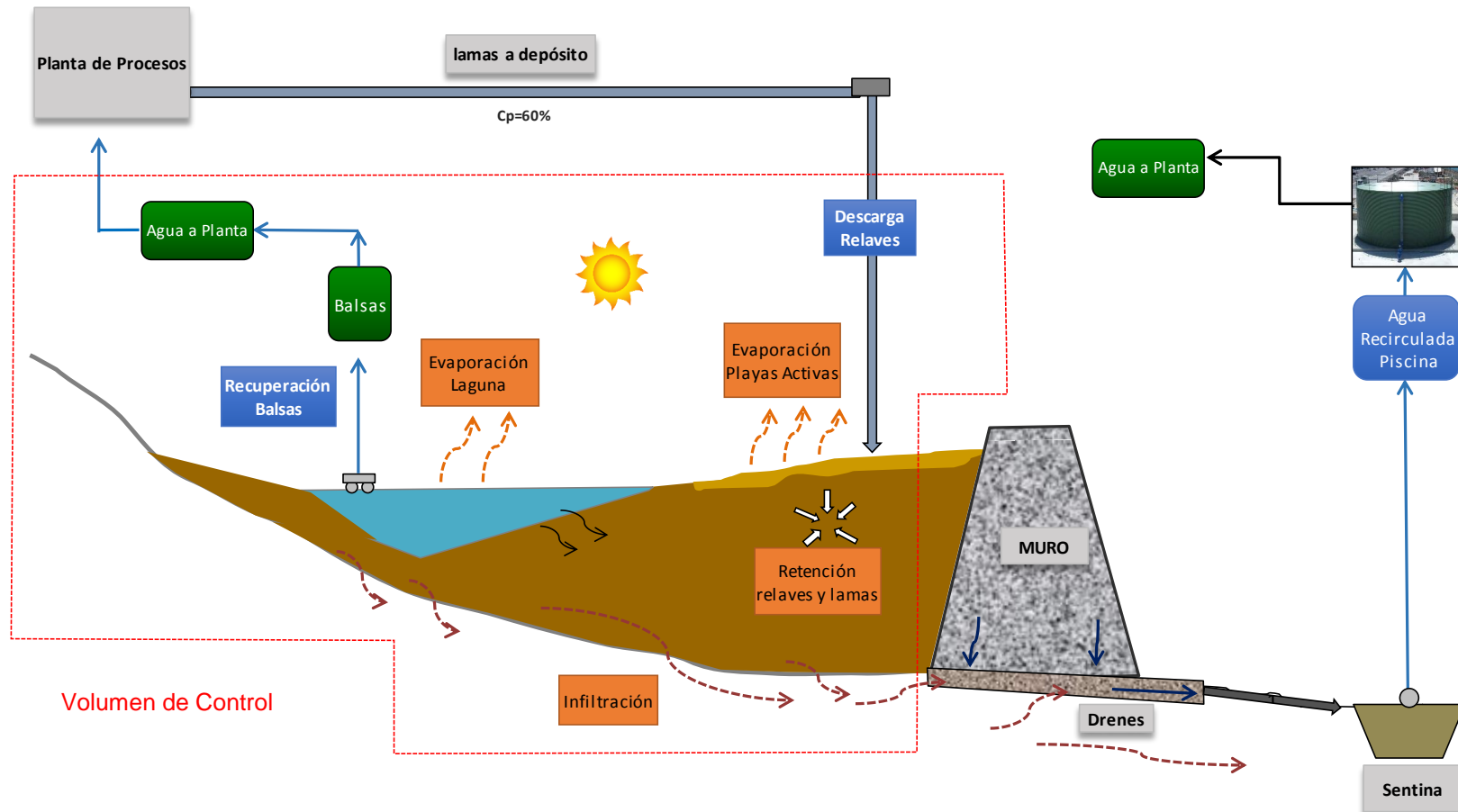
Figura 4-2: Infiltraciones totales proyectadas – Depósito La Brea (2019-2037) [Ref. 8]



4.2.4 Volumen de Control

En la siguiente Figura 4-3 se muestra un esquema con los flujos y el volumen de control considerado en el balance de aguas Depósito La Brea.

Figura 4-3: Esquema de flujos considerados en el balance de aguas y volumen de control



4.3 Datos de Entrada

Para la elaboración del modelo de balance de aguas, se consideraron los siguientes parámetros y criterios principales.

4.3.1 Características de los Relaves

Tabla 4-1: Características de los relaves – Operación en Régimen [Ref. 1]

Parámetro	Unidad	Valor
Gravedad Específica Partículas Sólidas (Gs)	t/m ³	2,82
Densidad Seca inicial Relaves Depositados	t/m ³	1,14 (esperado)
Concentración en peso (nominal)	%	60
Pendiente de Depositación	%	1,3

En base de los ensayos de sedimentación [Ref. 7] y de la estimación de la densidad seca de los relaves en profundidad, se determinó un rango de densidad seca inicial depositada, asociada al valor medio representativo de la capa de relaves depositados durante 30 días, equivalente a 1,0 metro aproximadamente.

El rango de densidad son los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 4-2: variación de la densidad inicial de relaves depositados

variable	Límite inferior	Límite superior	Descripción
Yd	1,14	1,31	densidad seca inicial relaves (t/m ³)
e	1,50	1,15	índice de vacíos
Wsat	0,53	0,41	humedad de saturación (%)

Para efecto del diseño del sistema de recirculación se adoptó en forma conservadora el valor de mayor densidad ya que posee un menor índice de vacíos y por consiguiente menor retención de agua.

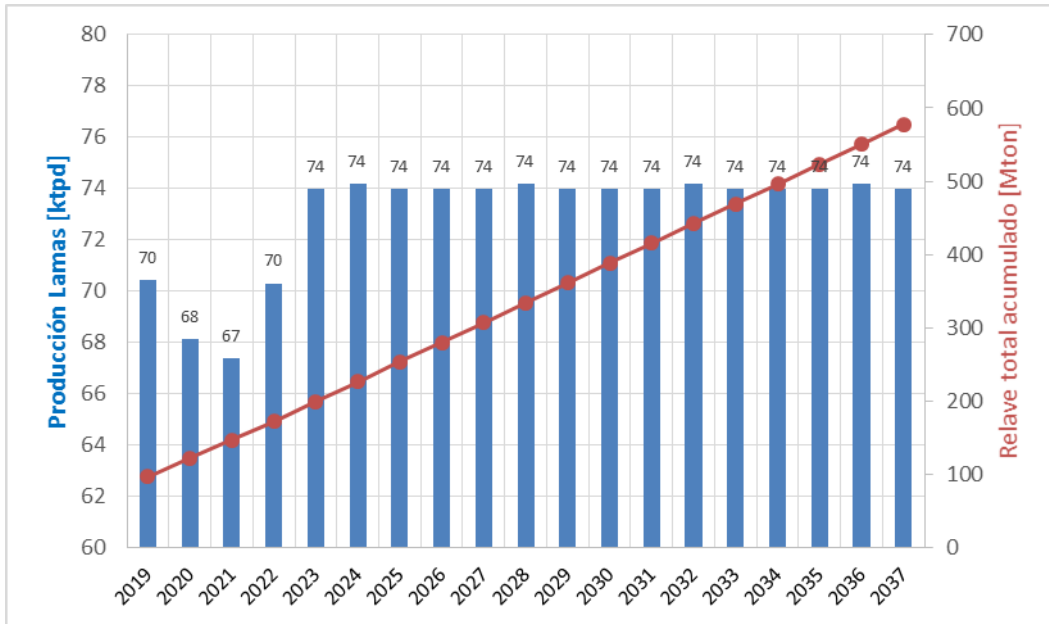
Con lo anterior se determinó que la densidad seca inicial utilizada en el balance de aguas para una capa de relaves depositados de 1 metro es de 1,31 t/m³, asociado a un índice de vacíos de e=1,15 y una humedad de saturación inicial de w=41%.

4.3.2 Plan Minero

La siguiente Tabla 4-3 y Figura 4-4 presentan el plan minero proyectado de producción de relaves expresado en ktpd, LOM 2018 ([Ref. 4]) entre el año 2019 y el año 2037, con un RAL promedio de 40/60, considerado en el presente estudio.

Tabla 4-3: Tasa de producción de relaves - operación en régimen [ktpd] [Ref. 4]

Año	producción relaves	tonelaje total acumulado
	ktpd	ton total
2019	70,4	97,0
2020	68,1	121,8
2021	67,4	146,4
2022	70,3	172,1
2023	74,0	199,1
2024	74,2	226,2
2025	74,0	253,2
2026	74,0	280,2
2027	74,0	307,2
2028	74,2	334,2
2029	74,0	361,2
2030	74,0	388,2
2031	74,0	415,2
2032	74,2	442,3
2033	74,0	469,3
2034	74,0	496,3
2035	74,0	523,3
2036	74,2	550,4
2037	74,0	577,4

Figura 4-4: Producción de Relaves (ktpd) [Ref. 4]

4.3.2.1 Pendiente de Depositación

De acuerdo a los criterios de diseño del depósito y al análisis de pendientes de depositación las pendientes medias de los relaves es de 1,3 % a lo largo de la operación [Ref. 3].

4.3.3 Datos Meteorológicos

a) Evaporación

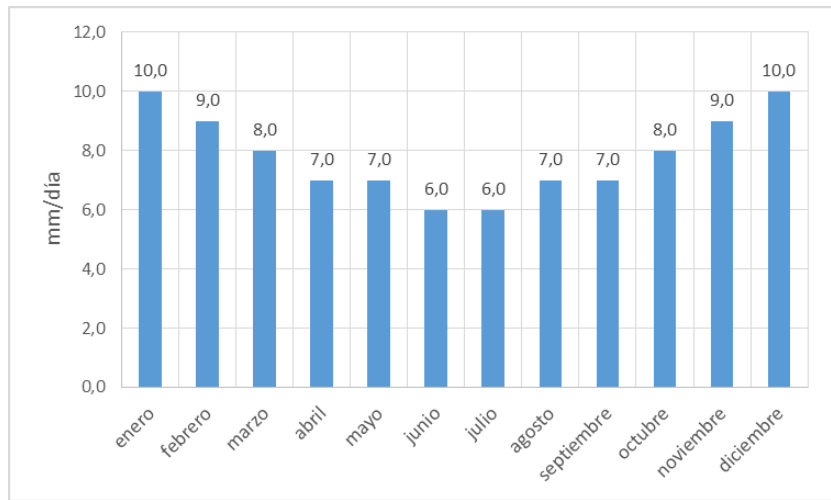
A partir de los registros de evaporación que son considerados en el balance operacional global del Depósito de Lamas La Brea [Ref. 6], se tomó como base el vector de evaporación media mensual y fue aplicado directamente para la estimación de la evaporación en playas activas y desde la superficie de la laguna de clarificación.

La evaporación potencial media diaria varía entre 3,3 mm/día en los meses de invierno a 8,4 mm/día en los meses de verano (ver Figura 4-5).

Para efectos del presente balance se utilizarán las tasas mensuales señaladas en la Figura 4-5, lo que permite incluir la estacionalidad y sus variaciones en los resultados del estudio.

Figura 4-5: Tasa de evaporación diaria [Ref. 6]

Mes	Evap [mm/día]	Evap [mm/mes]
enero	10,0	310
febrero	9,0	252
marzo	8,0	248
abril	7,0	210
mayo	7,0	217
junio	6,0	180
julio	6,0	186
agosto	7,0	217
septiembre	7,0	210
octubre	8,0	248
noviembre	9,0	270
diciembre	10,0	310
promedio	7,8	238,2

b) Precipitación

El sistema hídrico de la zona de estudio está conformado por el río Copiapó y sus afluentes ríos Jorquera, Pulido y Manflas ([Ref. 2]).

Figura 4-6: Estaciones pluviométricas DGA en el sector del depósito La Brea. [Ref. 2]



A nivel de precipitación media anual no se observan variaciones importantes en las estaciones medidas. Se puede observar si un aumento de las precipitaciones con la altura variando de 38,43 mm en la estación Los Loros ubicada a 950 m.s.n.m. a 44,93 mm en la estación Torín en el Potro ubicada a 3.000 m.s.n.m.

En todas las estaciones analizadas se observa que durante gran parte del año (septiembre a febrero) las precipitaciones son escasas con valores muy cercanos o iguales a cero [Ref. 2]. Durante el resto del año se observa que los valores aumentan con máximos en los meses de junio y julio, donde la precipitación media mensual en esos meses no supera los 10 mm, con un promedio total anual de 44 mm tomando la media de todas las estaciones pluviométricas DGA mostradas en la Figura 4-6.

Por otro lado, el Depósito de Lamas La Brea cuenta con canales de contorno perimetrales, que permiten captar y conducir las aguas de escorrentía superficial evitando que éstas ingresen al depósito, por lo que ante eventos meteorológicos la cantidad de agua que alcanza a acumularse en la laguna de clarificación corresponde a precipitación directa en la cubeta prácticamente en su totalidad. Adicionalmente se cuenta con un sistema de recirculación de agua que es capaz de extraer un caudal de agua que permite disminuir el volumen de la laguna en un tiempo acotado.

Por todo lo anterior, en el desarrollo del balance de aguas, no se considerará el ingreso de agua por concepto de precipitación.

4.3.4 Laguna Operacional

En el modelo de balance de aguas se considera una laguna constante en el tiempo, cuyo valor es de 500.000 m³ que corresponde al volumen objetivo que se busca mantener constante en el tiempo de operación, mediante el flujo de recirculación de agua objetivo que se obtiene como resultado del balance de aguas proyectado.

4.3.5 Recirculación de Agua

En el modelo se considera como salida el flujo de agua impulsada desde el sector de la laguna de clarificación mediante el sistema de balsas. Este parámetro se obtiene como resultado entre la diferencia de las entradas totales y pérdidas totales en el volumen de control.

4.3.6 Esquema de Depositación

De acuerdo al esquema de depositación de llenado del depósito, se estimó la longitud total de cada zona de descarga, medida desde el punto de depositación, hasta alcanzar el sector de manejo de bajo sólidos (laguna de operación).

A partir del estudio de pendientes media de depositación [Ref. 3], y de las simulaciones de llenado, se estimó una longitud media de largos de playa para cada año, que servirá como dato para la estimación de áreas de playas activas en el balance de aguas, tal como se muestran en las siguiente Figura 4-7 (mes 12) y Figura 4-8 (año 37) donde se indican los largos de playa promedio.

Figura 4-7: Simulación de llenado del depósito – Año 2018

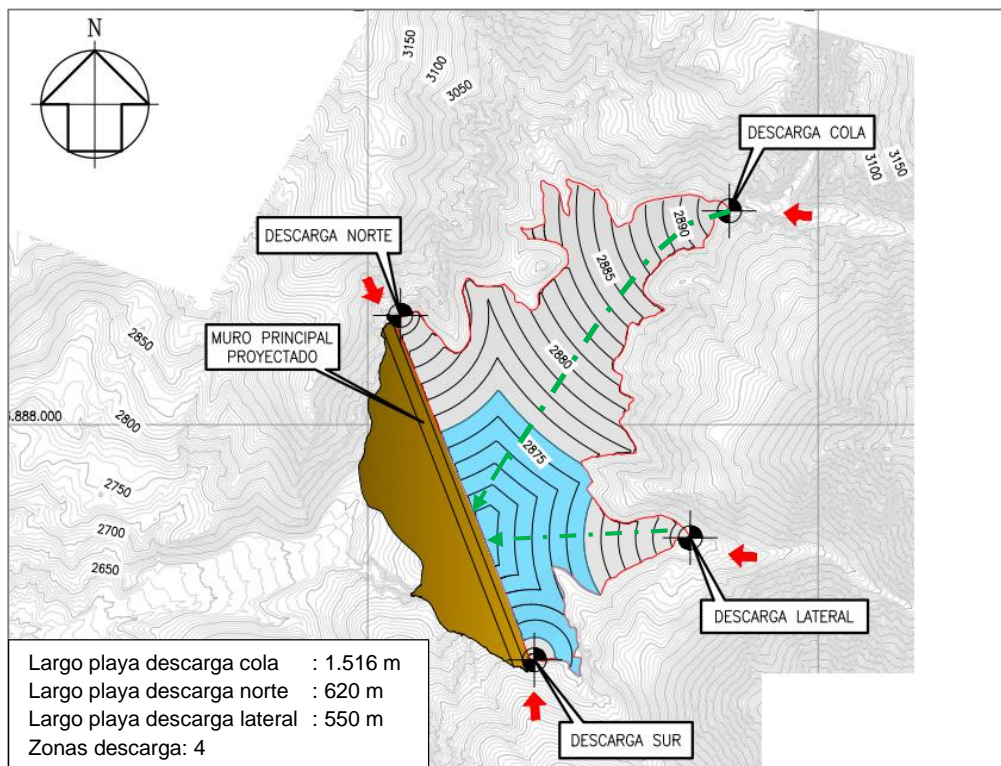
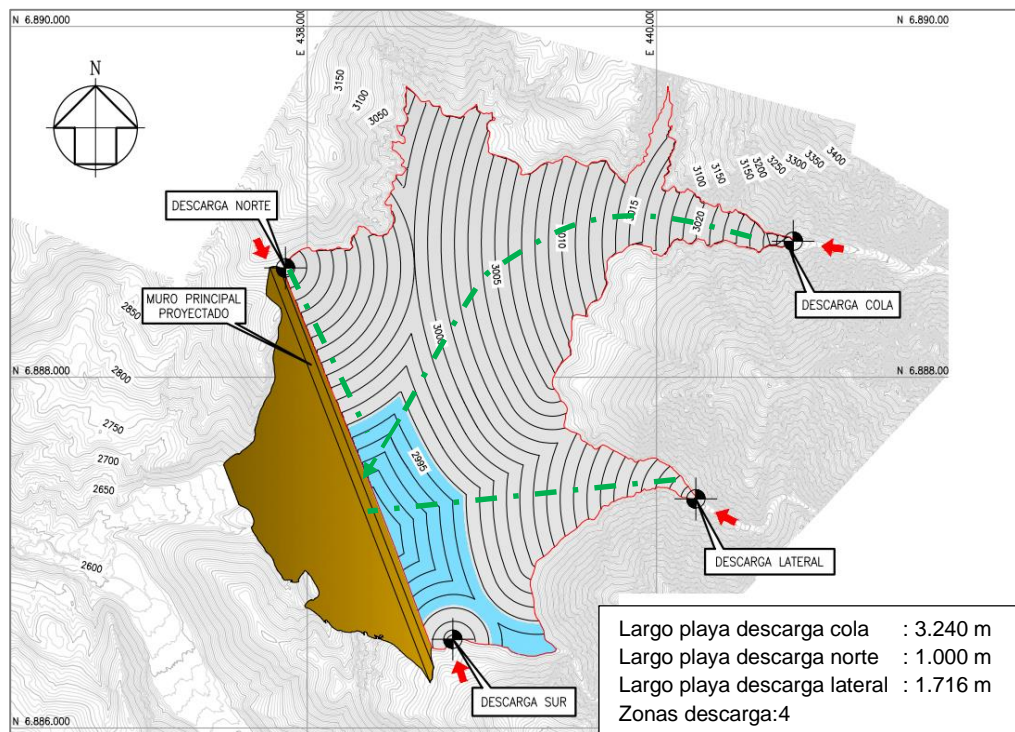


Figura 4-8: Simulación de llenado del depósito – Año 2037

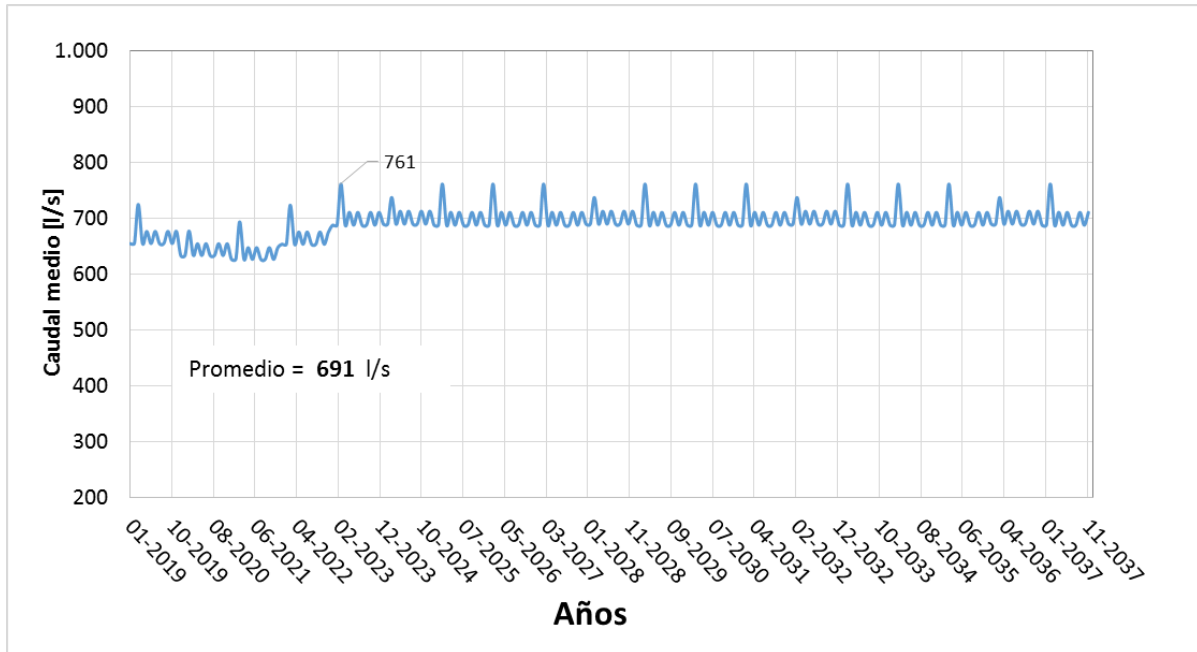
5 MODELO BALANCE DE AGUA PROYECTADO

Se procedió a realizar el modelo de balance de agua a nivel mensual a partir del año 2019 hasta el fin de la operación en el año 2037.

5.1 Resultados

5.1.1 Entradas de agua

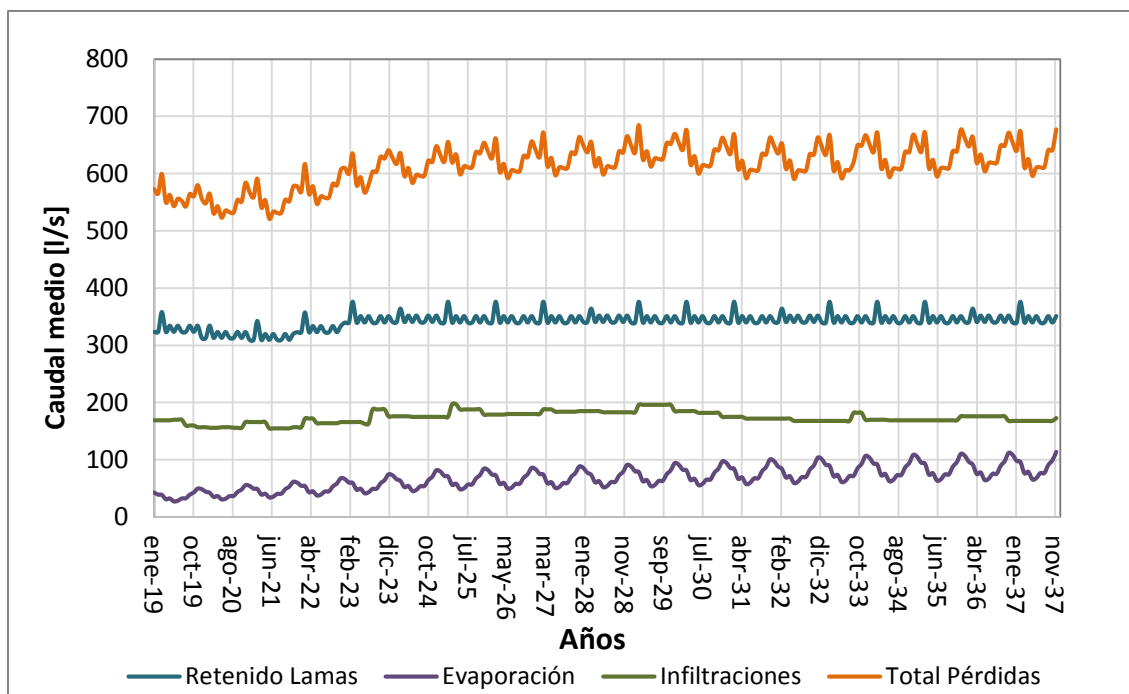
Para el periodo comprendido entre los años 2019 al año 2037 de operación, el ingreso de agua al sistema por concepto de depositación de lamas, presenta un caudal medio de 691 l/s, con un máximo de 761 l/s.

Figura 5-1: Entradas de agua Depósito (2019-2037)

5.1.2 Pérdidas de Agua

Las pérdidas totales son generadas por la retención de agua en los relaves, la evaporación desde las superficies húmedas y la infiltración de agua desde la cubeta. Como total las pérdidas totales presentan un flujo promedio de 613 l/s y un máximo de 684 l/s.

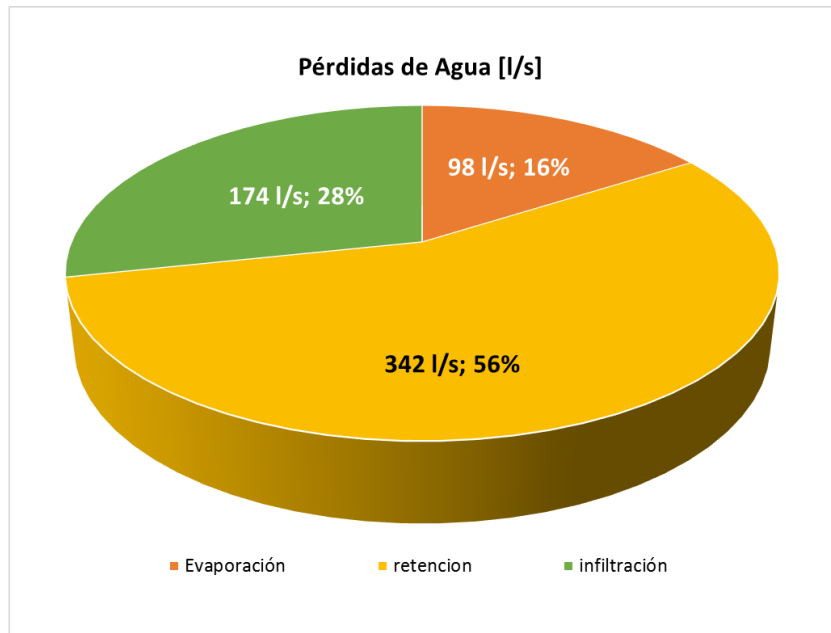
Cabe mencionar que prácticamente todas las pérdidas de agua se mantienen sin mayor variación, excepto la evaporación que aumenta levemente en el tiempo al existir mayor superficies evaporantes, y el agua retenida en las lamas que es variable en función de la producción de lamas, tal como se observa .

Figura 5-2: Evolución en el tiempo de las salidas de agua en el tiempo (2019-2037)

La Figura 5-3 presenta las composición de pérdidas de agua (pérdidas en la cubeta y recirculación) con el modelo de balance de aguas proyectado para el periodo comprendido entre el 2019 al 2037, cuyos valores están expresados como caudales medios anuales en litros por segundo.

Como se observa en la gráfica de la Figura 5-3 la pérdida con mayor magnitud corresponde al agua que queda retenida en los relaves depositados con un caudal medio de 342 l/s (56%), 174 l/s (28%). Otra pérdida de magnitud relevante corresponde a la infiltración total desde el volumen de control 174 l/s (28%) y la evaporación desde las superficies húmedas (playas activas y laguna) con un caudal de 98 l/s (16%), cuyo valor tiende a incrementarse en el tiempo dado que el área del depósito aumenta y por ende las áreas húmedas también.

La Tabla 5-1 resume el promedio, máximo y mínimo del flujo de las pérdidas de agua.

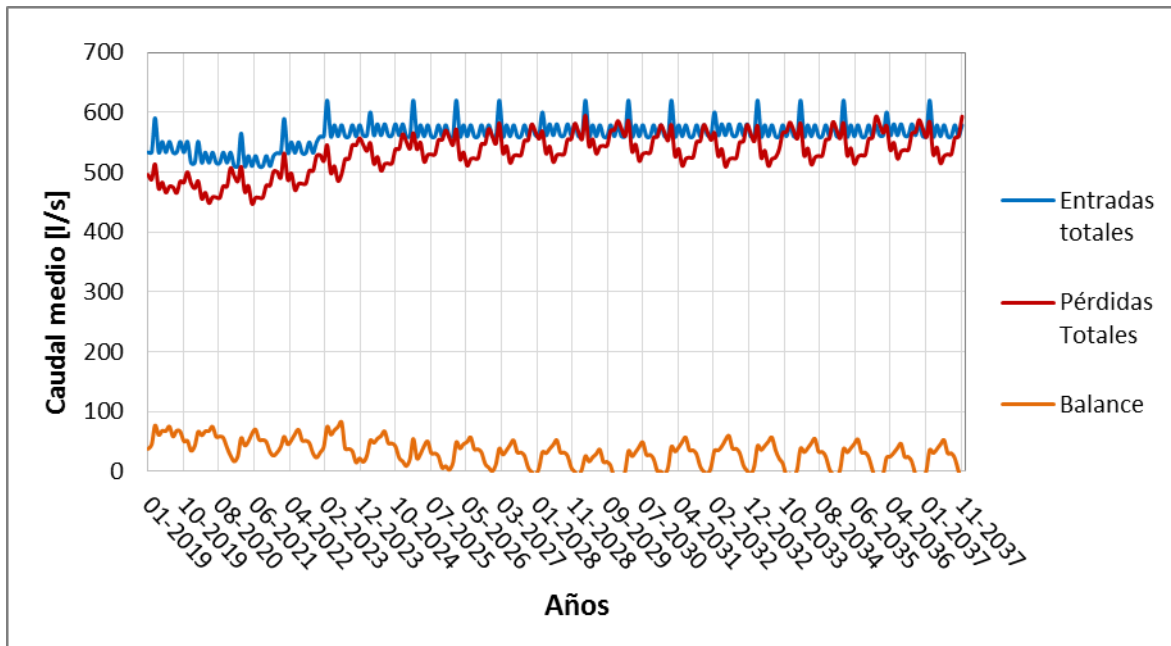
Figura 5-3: Composición promedio de pérdidas de agua (2019-2037)**Tabla 5-1: Resumen de flujos mensuales – Pérdidas de agua**

Variable	Caudal medio [l/s]		
	promedio	máximo	mínimo
Evaporación	98	153	50
Retención en Lamas	342	376	309
Infiltración	174	197	155
TOTAL	613	726	514

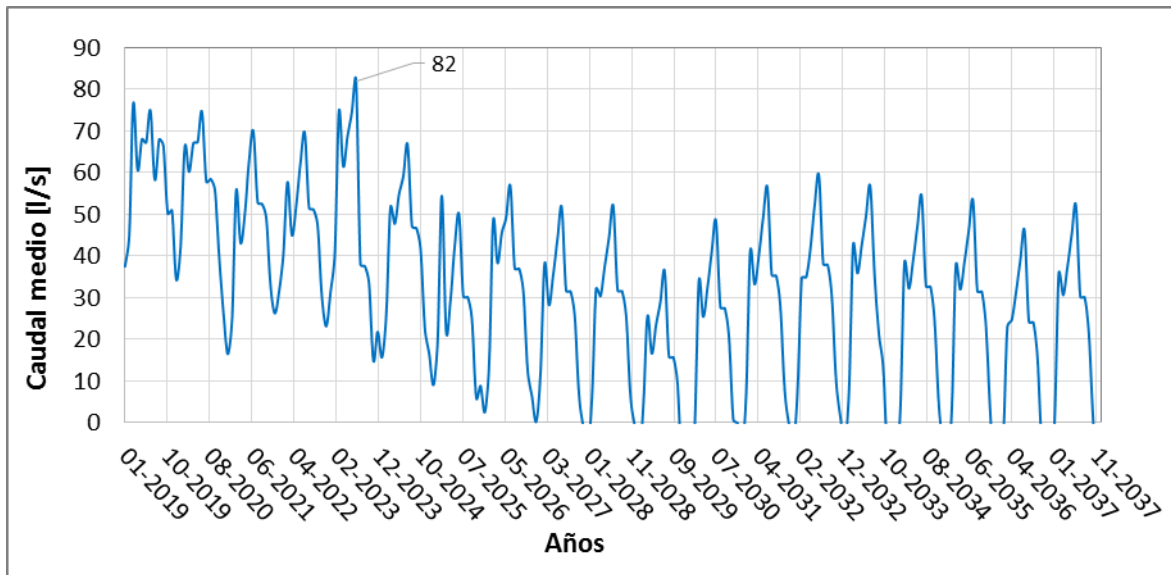
5.1.3 Balance Cubeta – Depósito La Brea

Con las entradas y las salidas de agua definidas (pérdidas y recirculación), es posible determinar la cantidad de agua que eventualmente podría alcanzar a la zona de la laguna de clarificación y estimar el rango del volumen de la laguna durante el periodo de tiempo analizado.

Los resultados obtenidos del balance de aguas arroja resultados positivos en el balance lo que significa que tenemos flujos potenciales que alcanzarían a acumularse en la laguna, cuyo valor medio es de 32 l/s y un máximo (caudal peak) de 82 l/s, como se aprecia en la gráfica de la Figura 5-4 en línea anaranjada.

Figura 5-4: Resultados Balance de Aguas – Variación Densidad

Analizando en con mayor detalle el resultado del balance de aguas (ver Figura 5-5) se observa la variación estacional del flujo, con valores máximos en los meses de invierno y los valores mínimos en los meses de verano, considerando además que el flujo es cero a partir del año 2025, pues la pérdida por evaporación tiende a aumentar en el tiempo como consecuencia de que la superficie evaporante se incrementa.

Figura 5-5: Variación del flujo de recuperación de agua desde laguna

Este análisis realizado con la variación de la densidad inicial de las lamas depositadas equivalentes, es el considerado para el diseño del sistema de recirculación de agua, por lo que se denomina “Caso Base”, el cual será sensibilizado en las siguientes secciones del presente informe.

Los resultados a nivel semestral del balance, con los principales flujos involucrados expresados en litros por segundo (l/s), se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Resultados Balance de Aguas a nivel semestral (2019-2037) – Caso Base

Fecha	Lamas a la Brea	Entradas de agua	pérdida por evaporación	Pérdida por Infiltración	Pérdida por retención	Total Pérdidas	Balance
	l/s	l/s	l/s	l/s	l/s	l/s	l/s
ene-19	69.106	533	80,61	169	246	496	38
jun-19	69.106	533	49,81	170	246	466	67
ene-20	66.843	516	86,41	157	238	481	34
jun-20	66.843	516	53,29	157	238	448	67
ene-21	66.118	510	92,22	166	235	494	16
jul-21	68.322	527	58,90	155	243	457	70
ene-22	68.985	532	97,82	157	246	500	32
jul-22	71.284	550	62,58	164	254	480	70
ene-23	72.581	560	104,10	166	258	529	31
jul-23	75.000	579	66,57	163	267	497	82
ene-24	72.782	562	110,68	176	259	546	16
jul-24	75.208	580	70,72	175	268	514	67
ene-25	72.581	560	117,46	175	258	551	9
jul-25	75.000	579	73,61	188	267	529	50
ene-26	72.581	560	119,99	179	258	557	3
jul-26	75.000	579	74,78	180	267	522	57
ene-27	72.581	560	121,25	180	258	560	0
jul-27	75.000	579	75,92	184	267	527	52
ene-28	72.782	562	123,67	185	259	568	-6
jul-28	75.208	580	77,49	183	268	528	52
ene-29	72.581	560	126,30	183	258	568	-8
jul-29	75.000	579	79,26	196	267	542	36
ene-30	72.581	560	129,39	185	258	573	-13
jul-30	75.000	579	81,19	182	267	530	48
ene-31	72.581	560	132,53	175	258	566	-6
jul-31	75.000	579	83,14	172	267	522	56
ene-32	72.782	562	135,69	172	259	567	-5
jul-32	75.208	580	85,10	168	268	521	59
ene-33	72.581	560	138,85	168	258	565	-5
jul-33	75.000	579	86,91	168	267	522	57
ene-34	72.581	560	141,52	170	258	570	-10
jul-34	75.000	579	88,27	169	267	524	54
ene-35	72.581	560	143,25	169	258	571	-11
jul-35	75.000	579	89,35	169	267	525	53
ene-36	72.782	562	144,98	176	259	580	-19
jul-36	75.208	580	90,40	176	268	534	46
ene-37	72.581	560	146,64	168	258	573	-13
jul-37	75.000	579	91,42	168	267	527	52
dic-37	75.000	579	153,06	173	267	593	-14
Promedio	72.984	563	98	174	260	531	32

5.2 Sensibilizaciones

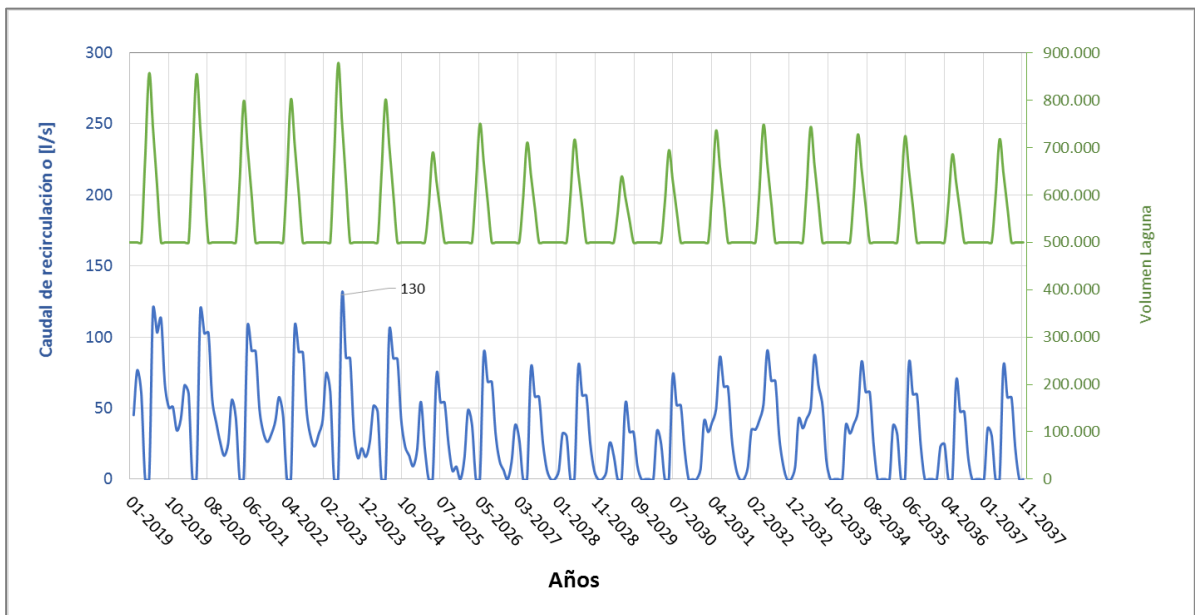
Se realizaron sensibilizaciones para evaluar el caudal necesario de extracción desde la laguna, ante eventualidades tales como son eventos operacionales asociados al fallo del sistema de bombeo, la reducción del volumen de laguna en un tiempo acotado, y además se analizaron eventos meteorológicos de precipitación y su influencia en el balance.

5.2.1 Eventos Operacionales

Se simula el caso de que en los meses de invierno, existe un fallo en el sistema de bombeo que impide su funcionamiento en un tiempo de 2 meses, y luego producto del aumento de nivel de laguna, se busca lograr reducir su volumen a 500.000 m³ en un tiempo acotado de 3 meses.

Como resultado del evento operacional, el flujo requerido para mantener la laguna entorno a los 500.000 m³ como objetivo, posee un promedio de 78 l/s y un máximo de **130 l/s** como se observa en la gráfica de la Figura 5-6 que muestra la evolución del volumen de la laguna en el tiempo y el flujo de extracción necesario.

Figura 5-6: Flujo de agua recirculada y volumen de laguna



5.2.2 Eventos Meteorológicos

Se modelaron dos casos de eventos de precipitación con un periodo de retorno de 10 y 20 años para una tormenta de duración de 24 horas, utilizando los valores de precipitación del informe “Estudio Hidrológico” [Ref. 2], cuyo evento se incorpora en los meses de junio en cada año de balance de aguas.

Para ello se considera el funcionamiento de los canales de contorno, por lo que el volumen de agua generado corresponde a la precipitación directa sobre las superficies húmedas en la cubeta, vale decir, área de playas húmedas y área de laguna.

Los valores de entrada de la sensibilización se resumen en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Datos de entrada sensibilización evento meteorológico

	Unidad	T=20 años	T=10 años
Área cubeta	m ²	1.983.952	1.983.952
Precipitación. máx. 24 hrs	mm	67	50
	m	0,067	0,05
Volumen agua adicional	m ³	132.925	99.198

Con los volúmenes adicionales producto de las precipitaciones, se estimaron los flujos de agua recuperada necesarios para mantener constante la laguna en 500.000 m³, con valores máximos de extracción de 155 l/s para un evento de 10 años, y 168 l/s para 20 años de periodo de retorno.

Tabla 5-4: Resultados flujos de agua recuperada – Eventos meteorológicos

Variable	Caudal medio [l/s]		
	promedio	máximo	mínimo
T= 10 años	78	155	22
T= 20 años	79	168	22

Considerando que el caso base posee un máximo de extracción de 130 l/s, se evaluó el tiempo requerido para poder reducir la laguna a 500.000 m³, posterior a la tormenta. El resultado es de 9 días de extracción continua desde la laguna para el evento asociado a T=10 años, y 11 días para T=20 años.

6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Del análisis realizado en el presente estudio, se puede comentar que al considerar un flujo de extracción promedio de 130 l/s es posible mantener el volumen de laguna equilibrado y constante en el tiempo, considerando incluso eventualidades operacionales y variaciones en la densidad de las lamas, por lo que el flujo de diseño se enmarca en un criterio conservador.

Al evaluar eventos meteorológicos de precipitación es posible reducir el volumen de agua adicional generado en la laguna de clarificación, en aproximadamente 10 días para mantenerla en el volumen de 500.000 m³, considerando un evento de periodo de retorno de 20 años.

Si bien existen otro tipo de eventos operacionales, tales como: lavados de espesadores, paradas de planta, detención en ciclones, etc., el flujo o volumen adicional que se generaría es menor a los valores abordados en el presente análisis, por lo que con el nivel de extracción de diseño de **130 l/s** quedarían cubiertas diversas eventualidades.

Arcadis

Av, Antonio Varas 621
Providencia, Santiago
T: +56 2 2381 6000

arcadis.com