

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

CÓDIGO ARCADIS: N° 5031-6640-GE-INF-0001

MODELO DE INFILTRACIONES DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA INFORME DE ACTUALIZACIÓN / RECALIBRACIÓN A DIC 2017 Y SIMULACIÓN A DIC 2037 Y PERIODO DE CIERRE

JULIO 2019

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre Firma	R. Herrera	J. Lagos	C. Díaz	Coordinación Interna
	Fecha	08.08.2018	08.08.2018	08.08.2018	
B	Nombre Firma	R. Herrera	J. Lagos	C. Díaz	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	10.08.2018	10.08.2018	10.08.2018	
0	Nombre Firma	R. Herrera	J. Lagos	C. Díaz	Aprobado Cliente
	Fecha	23.11.2018	23.11.2018	23.11.2018	
1	Nombre Firma	J. León	R. Herrera	J. Lagos	Aprobado Cliente
	Fecha	12.07.2019	12.07.2019	12.07.2019	

Este documento NO ES APTO PARA CONSTRUCCIÓN.

CONTACTO

JOSE LAGOS
Jefe de Proyecto

T +56 22 386 2038
e jose.lagos@arcadis.com

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

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	6
2 REFERENCIAS	7
3 RESUMEN CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	8
4 ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MODELO NUMÉRICO.....	13
4.1 Código de modelación	13
4.2 Dominio de modelación	13
4.3 Discretización espacial	14
4.4 Discretización temporal	17
4.5 Geometría y capas del modelo	17
4.6 Caracterización de las lamas depositadas	20
4.6.1 Granulometría	20
4.6.2 Ensayos de Sedimentación y Consolidación.....	21
4.6.3 Ensayos de Permeabilidad.....	22
4.6.4 Análisis de densidad y permeabilidad en función de la profundidad	23
4.6.5 Implementación de la consolidación en el modelo numérico	27
4.7 Condiciones de borde	30
4.7.1 Recarga y descarga natural.....	30
4.7.2 Extracciones de aguas subterráneas.....	30
4.7.3 Sistema de drenaje del muro del DLLB.....	33
4.7.4 Zanja cortafugas (ZCF)	34
4.7.5 Laguna de aguas claras	35
5 SIMULACIÓN DE CONDICIONES HISTÓRICAS (RECALIBRACIÓN DEL MODELO)...	37
5.1 Generalidades.....	37
5.2 Estrategia de calibración	37
5.3 Resultados.....	42
5.3.1 Propiedades hidráulicas	42
5.3.2 Comparación entre drenes y niveles de agua simulados vs observados	49
5.3.3 Estimación de infiltración durante operación histórica	50
5.3.4 Flujo subterráneo pasante aguas abajo de los drenes	52
5.3.5 Verificaciones adicionales	53
6 SIMULACIÓN DE OPERACIÓN PROYECTADA	55
6.1 Generalidades.....	55
6.2 Consideraciones para simulación de infiltraciones.....	55
6.2.1 Crecimientos	55
6.2.2 Dominio de modelación	57
6.2.3 Parámetros hidráulicos.....	57
6.2.4 Recarga y descarga natural.....	57
6.2.5 Extracciones de agua subterránea	58
6.2.6 Sistema de drenaje del muro.....	58
6.2.7 Laguna de aguas claras	58
6.3 Resultados.....	59
6.3.1 Infiltración proyectada	59
6.3.2 Caudal captado por el sistema de drenaje del muro principal.....	59
6.3.3 Permeabilidades de las lamas al final de la simulación	60
7 SIMULACIÓN PERÍODO DE CIERRE.....	62
7.1 Generalidades.....	62

7.2 Potencial de infiltración por consolidación de deformación finita	62
7.3 Resultados	64
8 RESUMEN Y CONCLUSIONES	67

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A	Discretización temporal del modelo de calibración
Anexo B	Extracciones de aguas subterráneas (MLCC)
Anexo C	Caudales estimados con el modelo (infiltración, drenes)
Anexo D	Discretización temporal modelo de simulación

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1. Resumen permeabilidades y almacenamientos por unidad hidrogeológica	9
Tabla 5-1 Capas del modelo numérico y correspondencia con depositaciones del DLLB	18
Tabla 5-2: Resultados índices de C_c y C_r de los ensayos de consolidación	22
Tabla 5-3: Masa, volumen y densidad seca promedio (datos históricos del DLLB)	23
Tabla 6-1: Resumen de parámetros calibrados	38
Tabla 6-2: Resumen de resultados de parámetros hidráulicos calibrados para unidades hidrogeológicas	43
Tabla 7-1: Resumen de crecimientos considerandos para operación proyectada	55
Tabla 8-1 : Área de la superficie libre del relave para distintas cotas de llenado (Ref. 5)	63
Tabla 8-2 : Tasa de depositación del relave cada año (Ref. 5)	63

LISTADO DE FIGURAS

Figura 4-1. Ubicación de pozos con información geológica sector La Brea	8
Figura 4-2 Modelo hidrogeológico 3D	11
Figura 4-3. Secuencia de unidades hidrogeológicas	12
Figura 5-1. Dominio del modelo numérico	14
Figura 5-2. Vista en planta de la grilla de 20 m empleada en el modelo numérico	15
Figura 5-3. Vista 3D de la grilla del modelo numérico	16
Figura 5-4: Resumen de resultados ensayos granulométricos en lamas	20
Figura 5-5: Resumen de resultados pruebas de sedimentación en lamas	21
Figura 5-6: Resumen de resultados ensayos de consolidación edométrica en lamas	22
Figura 5-7: Resultados ensayos de permeabilidad en lamas en función del índice de vacíos	23
Figura 5-8: Masa, volumen y densidad seca de los relaves almacenados en el tiempo	24
Figura 5-9: Ajuste de curva de densidad a la data histórica	25
Figura 5-10: Curvas de densidad versus elevación del depósito para distintos estados de operación	26

Figura 5-11: Ajuste de permeabilidad en profundidad	27
Figura 5-12: Curvas de variación de permeabilidad de lamas (K_v) en el tiempo para modelo de la Ref. 2	28
Figura 5-13: Comparación entre curva K_z vs Z (modelo de consolidación) e implementación en modelo numérico.....	29
Figura 5-14. Celdas usadas para ingresar la recarga/descarga subterránea mediante una condición de borde de altura conocida.....	30
Figura 5-15. Ubicación de pozos de bombeos considerandos en el modelo de infiltraciones	31
Figura 5-16. Caudal de bombeo para los pozos incluidos dentro del dominio del modelo	32
Figura 5-17. Drenes basales incluidos en el modelo numérico.....	33
Figura 5-18. Condiciones de borde aplicadas en zanja cortafuga	34
Figura 5-19. Altura umbral definida para DRN en ZCF.....	35
Figura 5-20. Variación del nivel de agua de la laguna de aguas claras considerada para el modelo actualizado	36
Figura 6-1: Zonificación inicial de K y S de zonas recalibradas	40
Figura 6-2: Caudal promedio mensual del aforador	41
Figura 6-3: Niveles observados en pozos considerados para la calibración del modelo	41
Figura 6-4: Ubicación de pozos de monitoreo considerados para la recalibración del modelo	42
Figura 6-5: Distribución de permeabilidades calibrada para unidad de aluviales (zona 5)	45
Figura 6-6: Histograma de permeabilidades calibrada para unidad de aluviales (zona 5).....	45
Figura 6-7: Permeabilidad inicial calibrada para lamas por etapa de crecimiento modelado.....	46
Figura 6-8: Permeabilidad inicial promedio calibrada vs aforador.....	47
Figura 6-9: Histograma de permeabilidad inicial calibrada para lamas	47
Figura 6-10: Vista 3D de las permeabilidades iniciales calibradas para lamas del DLLB	48
Figura 6-11: Histograma de permeabilidad de lamas a diciembre 2017	49
Figura 6-12. Comparación entre caudal simulado para sistema de drenaje y aforador	49
Figura 6-13. Comparación niveles simulados y observados.....	50
Figura 6-14: Zonas de balance empleadas para contabilizar las infiltraciones.....	51
Figura 6-15. Estimación de infiltraciones DLLB mayo 2014 a diciembre 2017	51
Figura 6-16. Estimación de infiltraciones DLLB desagregada por unidad hidrogeológica	52
Figura 6-17: Sección de control utilizada para calcular flujo subterráneo pasante aguas abajo de los drenes	52
Figura 6-18: Flujo subterráneo pasante por aluviales, comparación entre modelo original y modelo actualizado	53
Figura 6-19: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 1 a 6	53
Figura 6-20: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 7 a 9	54
Figura 6-21: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 10 a 14.....	54
Figura 6-22: Verificación de extracciones impuestas a pozos de REM incluidos en el modelo	54

Figura 7-1: Vista 3D del crecimiento histórico del depósito (arriba) y el crecimiento proyectado (abajo) para el DLLB.....	56
Figura 7-2: Modificación al dominio de modelación para simulación de operación proyectada	57
Figura 7-3: Sistema de drenaje considerado en simulación de operación proyectada	58
Figura 7-4: Evolución de la cota de laguna de aguas claras (900K m ³) en período histórico y de simulación.....	59
Figura 7-5: Infiltración estimada para el DLLB período 2018 a 2037	59
Figura 7-6: Caudal captado por el sistema de drenaje del DLLB período 2018 a 2037	60
Figura 7-7: Comparación entre la permeabilidad vertical (Kz) de lamas a diciembre 2037 (arriba) con diciembre (abajo)	61
Figura 8-1: Tensión Vertical Efectiva (σ_v') v/s el Índice de Vacíos (e)	64
Figura 8-2: Caudal de infiltración para el cierre del DLLB ("draindown").....	64
Figura 8-3: Caudal de infiltración por consolidación para el cierre del DLLB	65
Figura 8-4: Caudal de infiltración combinado para el cierre del DLLB	65
Figura 8-5: Humedad de retención para diferentes depósitos de relaves en Chile (Verdugo, et. al, 2017)	66

1 INTRODUCCIÓN

El yacimiento Caserones perteneciente a SCM Minera Lumina Copper Chile (**SCMMLCC**), tiene aprobado ambientalmente y sectorialmente una capacidad de almacenamiento total de 1.036 millones de toneladas de relaves. 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 el SMA ha solicitado presentar el proyecto actualizado para ser modificado y evaluado nuevamente.

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 2041, incluyendo la actualización del modelo de infiltraciones desarrollado por Arcadis para el Depósito de Lamas La Brea (DLLB), y sobre la base de la nueva ingeniería desarrollada por Arcadis estimar las infiltraciones futuras al término de la vida útil y durante el período de cierre.

Desde el año 2015 Arcadis se encuentra trabajando en el desarrollo y mejoramiento del modelo de infiltraciones para el DLLB. Este modelo combina un modelo hidrogeológico numérico tridimensional, de carácter local, con una representación explícita de la geometría del depósito y las propiedades hidráulicas de las lamas, incluyendo sus variaciones en el tiempo. De esta forma se representa de forma integrada y en 3D el crecimiento del DLLB, el cual es calibrado para representar el caudal captado por el sistema de drenaje del muro y los efectos que el DLLB ha generado sobre los niveles freáticos aguas abajo del muro hasta el sector de la Zanja Corta Fuga. De esta forma, la infiltración del depósito la estimación de infiltración se obtiene como un producto del proceso de calibración del modelo.

El primer modelo de infiltraciones fue construido empleando información estratigráfica de pozos perforados hasta el año 2015 y fue calibrado con información medida hasta el mes de febrero 2016 (Ref. 2), principalmente niveles de agua en pozos y el caudal del aforador. Posteriormente, el modelo fue actualizado y recalibrado en dos instancias, en el año 2017 con datos hasta octubre 2016 (Ref. 3).

En el presente trabajo se actualiza el modelo con datos hasta diciembre de 2017 (batimetrías, bombeos, aforador, niveles de agua en pozos), se incorpora caracterización geotécnica de las lamas del depósito, información previamente no disponible y mejora sustancialmente la representación del proceso de consolidación por peso propio de lamas (incremento de densidad en profundidad), el cual a su vez genera la reducción de la permeabilidad de éstas en el tiempo.

En este documento se presentan las principales características del modelo de flujo actualizado, la información utilizada para construirlo y sus principales resultados. La modelación desarrollada considera tres periodos los cuales son reportados en este documento de la siguiente manera:

- **Simulación de Operación Histórica** (calibración del modelo): mayo 2014 a diciembre 2017 (3,5 años)
- **Simulación de Operación Proyectada** (condiciones futuras): enero 2018 a diciembre 2037 (19 años)
- **Simulación de Cierre**: enero 2038 a diciembre 2537 (500 años).

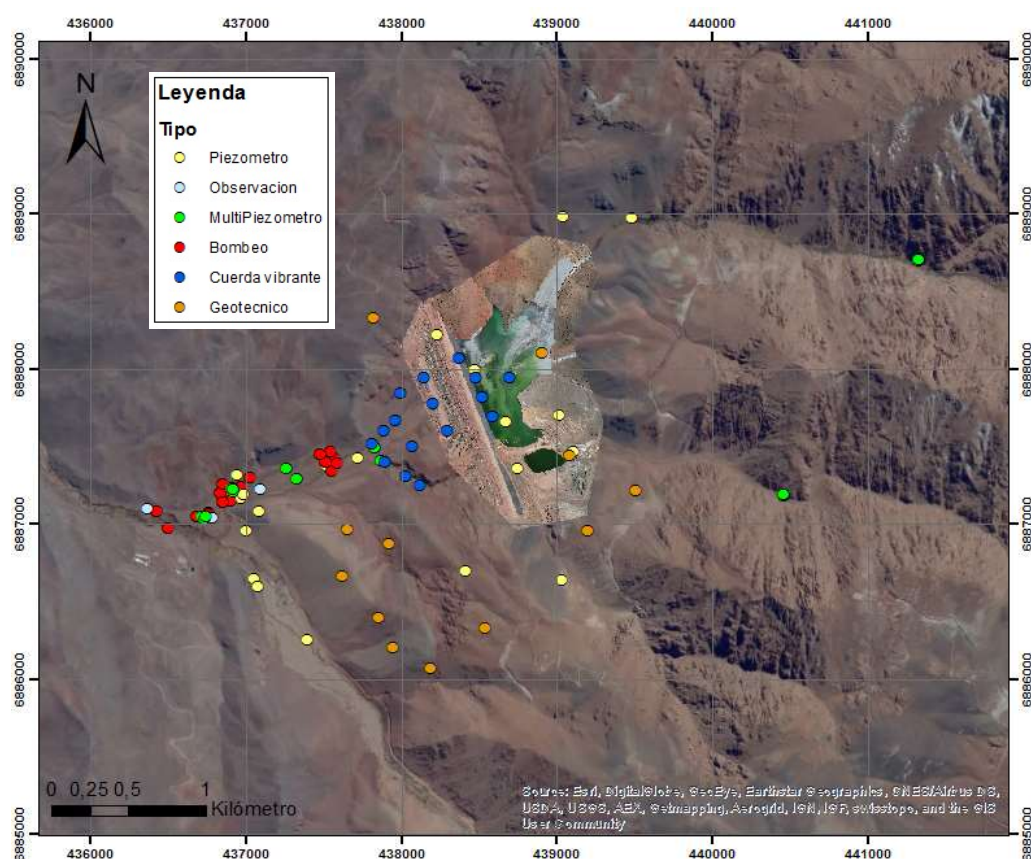
2 REFERENCIAS

- Ref. 1 Arcadis (2016): Conceptualización Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea. (Memorándum) N°4157-MMT-083). Proyecto Minera Caserones. Abril 2016
- Ref. 2 Arcadis (2016): Modelo de Simulación Para Estimación de Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea (Informe N°4157-6640-GH-INF-001). Proyecto Minera Caserones. Agosto 2016.
- Ref. 3 Arcadis (2017): Actualización y Recalibración modelo de infiltraciones Depósito de Lamas La Brea (Informe 4157-6640-GH-INF-002). Proyecto Minera Caserones. Mayo 2017.
- Ref. 4 Arcadis, (2017): Resultados Ensayos de Laboratorio en Lamas Cajones 2 y 4 (Memorándum N°4157-MMT-136 Rev. B). Proyecto Caserones. Junio 2017.
- Ref. 5 Arcadis (2018): Esquema Depositación y Curva de Crecimiento Depósito de Lamas La Brea. Proyecto Minera Caserones. Mayo 2018.
- Ref. 6 Arcadis (2018): Informe Consolidado Estudio Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea (Informe 4896-6640-GE-INF-006). Proyecto Minera Caserones. Junio 2018.
- Ref. 7 Doherty, J. (2003). Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. Groundwater. Vol 41. N°2. March-April, 2003.
- Ref. 8 Doherty, J., Fienen, M., Hunt, R.J., (2010). Approaches to Highly Parameterized Inversion: Pilot-Point Theory, Guidelines, and Research Directions. Scientific Investigations Report 2010-5168. United State Geological Survey (USGS).
- Ref. 9 Doherty, J., Hunt, R.J., (2010). Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration. Scientific Investigations Report 2010-5169. United State Geological Survey (USGS).
- Ref. 10 Doherty, J. (2018). PEST Model-Independent Parameter Estimation. User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers. 7th Edition. Watermark Numerical Computing.
- Ref. 11 Panday, S. y otros (2013). MODFLOW-USG Version 1: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite-Difference Formulation. US Geological Survey Techniques and Methods book 6, chap. A45. 2013.
- Ref. 12 Panday, S. (2018). Block-centered Transport (BCT) Process for MODFLOW-USG Version 1.1.0. Sorab Panday, GSI Environmental.
- Ref. 13 Verdugo, R. y otros (2017). *Evaluation of Tailings Dams Subjected to Large Earthquakes*. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea 2017.

3 RESUMEN CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La conceptualización hidrogeológica fue desarrollada y descrita en Ref. 1 y Ref. 2. Dicha conceptualización no ha sido modificada para la presente actualización y se basa en la integración de información proveniente desde: 64 pozos y sondajes con información litológica en el sector de la Brea (Figura 3-1), mapas geológicos de superficie, información geofísica y antecedentes de terreno se construyó un modelo hidrogeológico en 3D con el software Leapfrog Hydro 2.5.1.

Figura 3-1. Ubicación de pozos con información geológica sector La Brea



Fuente: modificada de Ref. 2

A continuación se describen las unidades hidrogeológicas definidas en Ref. 2 y que forman la base del modelo numérico que es presentado en este informe y se presentan los rangos de permeabilidad para cada una de ellas.

Tabla 3.1. Resumen permeabilidades y almacenamientos por unidad hidrogeológica

Unidad	K min	K max	S Min	S Max
	(m/día)	(m/día)	(-)	(-)
Basamento	1E-03	1E-02	-	-
Lavas Triásicas	1E-03	1E-02	1,0E-08	1,0E-05
Sedimentario Lagunillas	1E-03	5	1,0E-08	1,0E-01
Lavas Lagunillas	1E-03	6	1,0E-08	1,0E-01
Cuaternario	1E-02	>15	1,0E-03	2,0E-1
Roca Alterada/Fracturada (indiferenciada)	1E-02	10	1,0E-08	1,0E-01

Fuente: Elaboración propia

Basamento: En esta unidad se agrupan las rocas intrusivas de edades paleozoicas y más recientes. Aflora en la parte oriental de la zona de estudio y presenta cierto alzamiento en el sector de la quebrada La Brea, inmediatamente aguas abajo del depósito de lamas. Corresponde al basamento hidrogeológico de baja permeabilidad, en general sin alteración y fracturamiento. En base a información de ensayos hidráulicos y sus características litológicas se estimaron valores de permeabilidad entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d para la roca fresca.

Lavas Triásicas: Corresponde a la secuencia volcanoclástica Triásica (Fm. de La Ternera), incluyendo los miembros compuestos por brechas y lavas. No existen evidencias de subsuperficie sobre su continuidad aguas abajo del muro, hacia el oeste de la quebrada La Brea, pero dada su concordancia con las unidades jurásicas que la sobreyacen, para efectos del modelo se infiere su continuidad con un buzamiento entre 15° a 25° hacia el NW.

Esta unidad podría encontrarse fracturada y/o alterada en el miembro compuesto por lavas y no así en el miembro brechoso. Esto se traduce en una baja permeabilidad en el sector nororiente del depósito, mientras que en el estribo derecho (norte) tienen un mayor grado de alteración-meteorización que la hace deleznable y con una mayor permeabilidad. Ensayos de Lugeon en los pozos SDL-04 y SDL-05 entregan rangos de permeabilidad entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d para la roca sana.

Miembro sedimentario inferior Formación Lagunillas: En esta unidad se agruparon las areniscas basales y conglomerados superiores de la Formación Lagunillas que afloran en la quebrada La Brea. Ensayos en los sondeos SDL-02, SBL-08, SDL09 y SDL-11 indican permeabilidades entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d.

Lavas Formación Lagunillas: Corresponden a las lavas que sobreyacen al miembro sedimentario de la Fm. Lagunillas, y que en general se encuentran competentes en superficie, con permeabilidades en los sondeos SDL-09, SDL-11, SDL12, entre 10^{-3} y 10^{-1} m/d.

Miembro sedimentario superior Fm. Lagunillas: Conformado por areniscas rojas y dispuesto de forma concordante sobre las lavas de la misma formación. Se ha reconocido de forma regional y no tiene mayor relevancia en la hidrogeología del sector debido a su ubicación en el extremo occidental de la quebrada y a su posición estratigráfica elevada. Dado su similitud litológica con el miembro sedimentario inferior de la Fm. Lagunillas se le otorgan permeabilidades entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d.

Rocas indiferenciadas fracturadas/meteorizadas: En esta se agrupan sectores de: (1) las lavas triásicas, (2) miembro sedimentario inferior, lavas de la Fm. Lagunillas y, en muy menor proporción, (3) zonas superiores del basamento. Que tienen una mayor permeabilidad debido a fracturamiento, meteorización y/o alteración local, relativo a lo estimado para las rocas sanas. Se ha identificado aguas arriba del muro del depósito, en la ladera norte y la parte central. Se estima una permeabilidad de hasta 5 m/d.

Cuaternario: En esta unidad se han agrupado todos los depósitos no consolidados compuestos por gravas, arenas y finos en proporciones variables, con orígenes aluviales, fluviales y coluviales. La unidad presenta espesores variables que van desde unos pocos metros hasta los 45 metros en la confluencia con el río Ramadillas y las pruebas de bombeo indican permeabilidades que superan los 15 m/d.

Corresponde a la unidad de mayor relevancia hidrogeológica debido a su alta permeabilidad y continuidad en la quebrada La Brea. Si bien estos sedimentos fueron removidos en una parte importante cuando se construyó el Depósito de Lamas, aún se encuentran en ciertos sectores de la cubeta. Aguas abajo del muro del depósito conforman el Cerro Sin Nombre donde se apoya este mismo en su mitad sur. También se reconoce con espesores variables en todas las quebradas afluentes a La Brea. Originalmente el nivel freático se encontraba cercano al contacto entre estos depósitos y las unidades de roca subyacente, situación que ha sido modificada por la operación del Depósito.

En la Figura 3-2, Figura 3-3 se muestran imágenes del modelo hidrogeológico 3D y de la posición estratigráfica y geometría de cada unidad.

Figura 3-2 Modelo hidrogeológico 3D

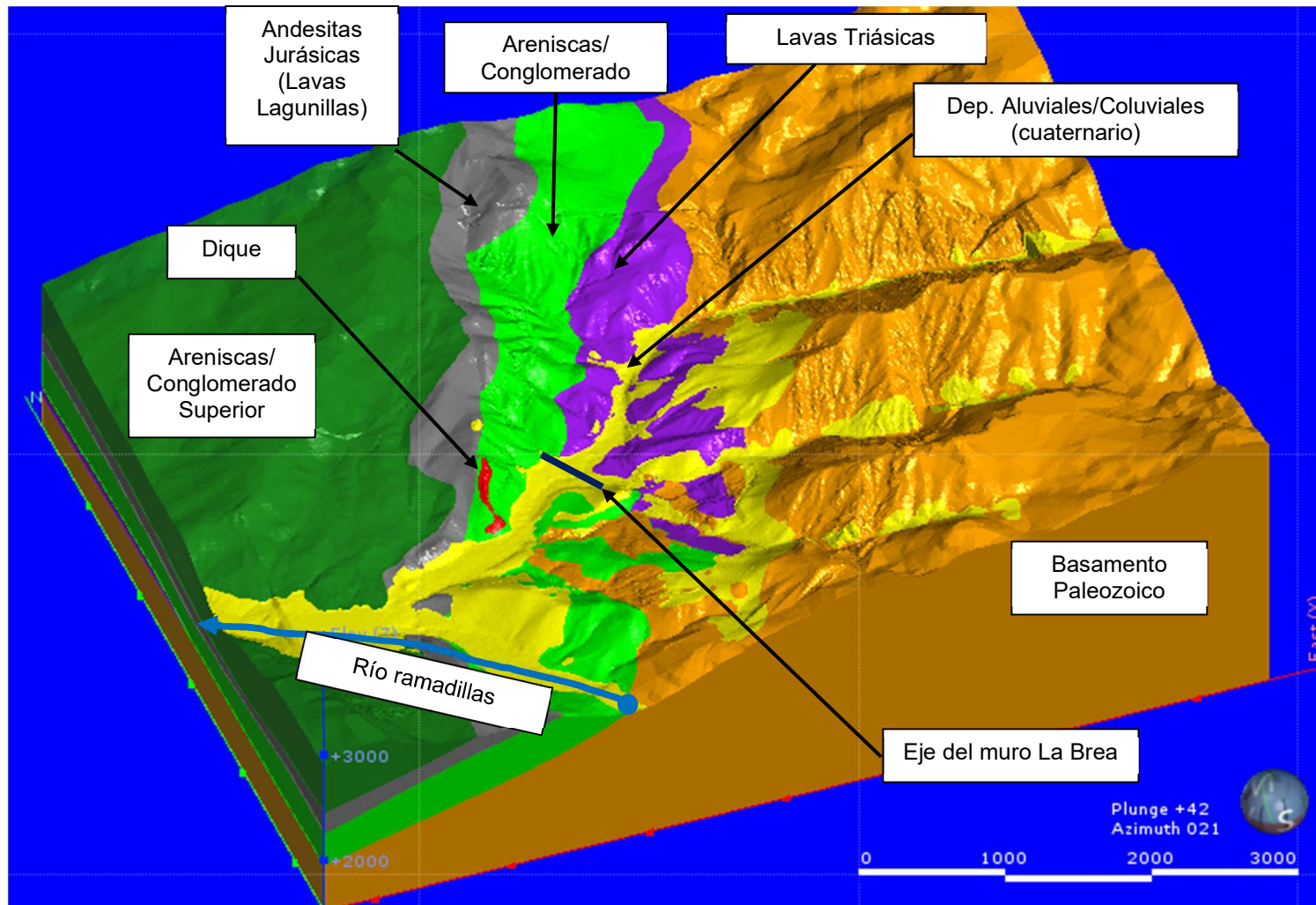
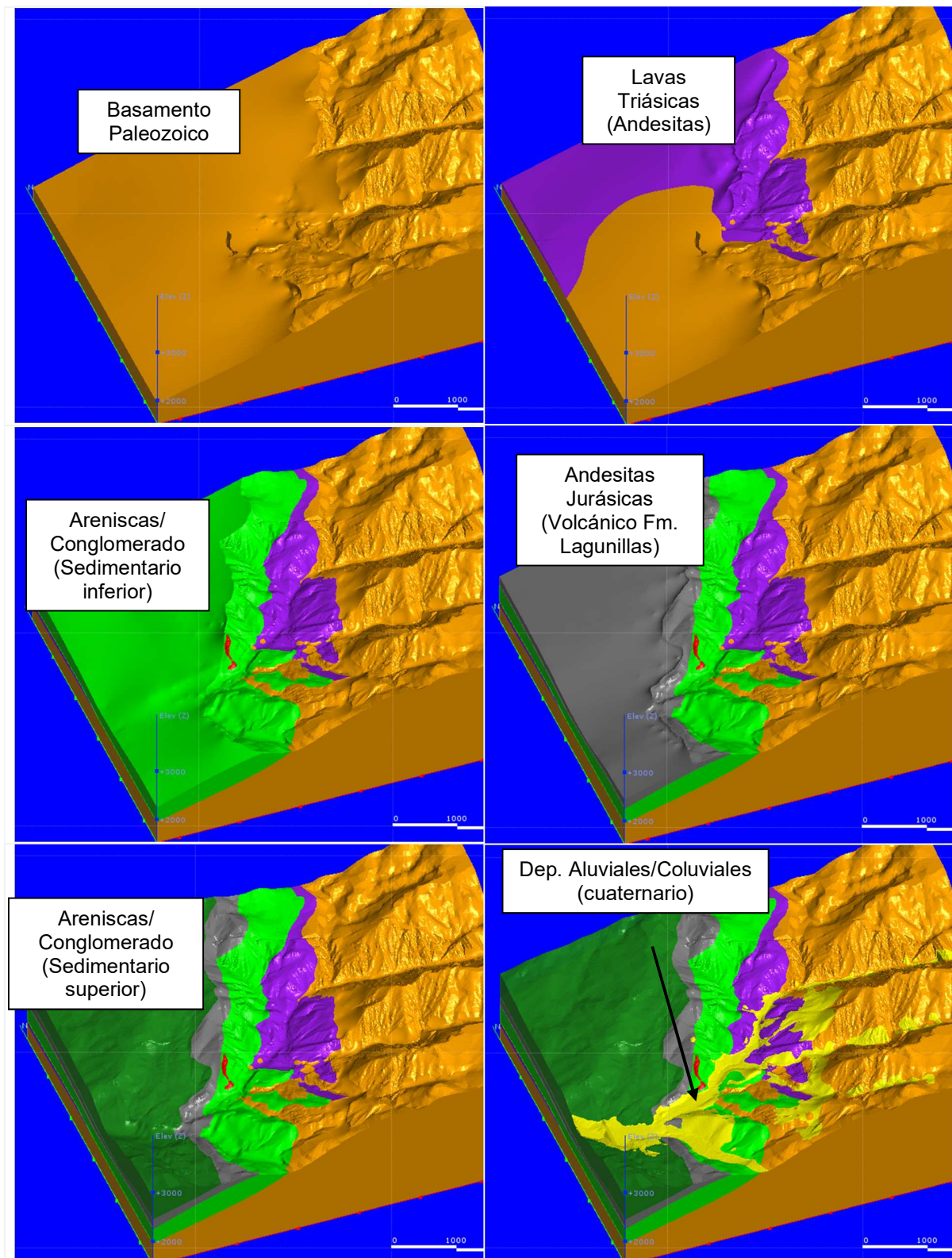


Figura 3-3. Secuencia de unidades hidrogeológicas



Fuente: Elaboración propia

4 ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MODELO NUMÉRICO

En el presente capítulo se presentan las principales características del modelo numérico desarrollado, indicando cuales puntos han sido mantenidos y cuales elementos fueron modificados para actualizar el modelo a Dic 2017, respecto de las versiones anteriores descritas en Ref. 2 y Ref. 3.

4.1 Código de modelación

Para simular el flujo de infiltración se ha optado por el uso del código MODFLOW-USG (Ref. 11, Ref. 12). A diferencia de sus predecesores MODFLOW-USG utiliza la técnica de volúmenes finitos, lo cual corresponde a un avance significativo en la tecnología de modelación hidrogeológica disponible para modelos tipo MODFLOW. Entre otras ventajas, este código permite generar refinamientos focalizados de la grilla, reduce los problemas de convergencia numérica asociados a la re-humectación/secado de celdas, permite la activación/desactivación de partes del dominio en el tiempo, la variación de la permeabilidad y almacenamiento en el tiempo, entre otros atributos. MODFLOW es uno de los códigos recomendados por la guía del SEA (2012) para evaluaciones ambientales en Chile, razón por la cual es considerado para el desarrollo de la herramienta numérica mencionada.

El modelo numérico de flujo 3D fue implementado sobre la plataforma gráfica Groundwater Vistas 7 (GV7) empleando el código USG-Transport 1.1 (versión de flujo y transporte de MODFLOW-USG), ya que dispone de las capacidades avanzadas necesarias para realizar esta modelación.

4.2 Dominio de modelación

El dominio del modelo no ha sido modificado respecto de su delimitación original. Este fue definido considerando que sus dimensiones permitan mantener las condiciones de borde lo suficientemente alejadas del depósito para no interferir con el proceso que se busca simular: infiltración desde éste y la respuesta en los drenes basales.

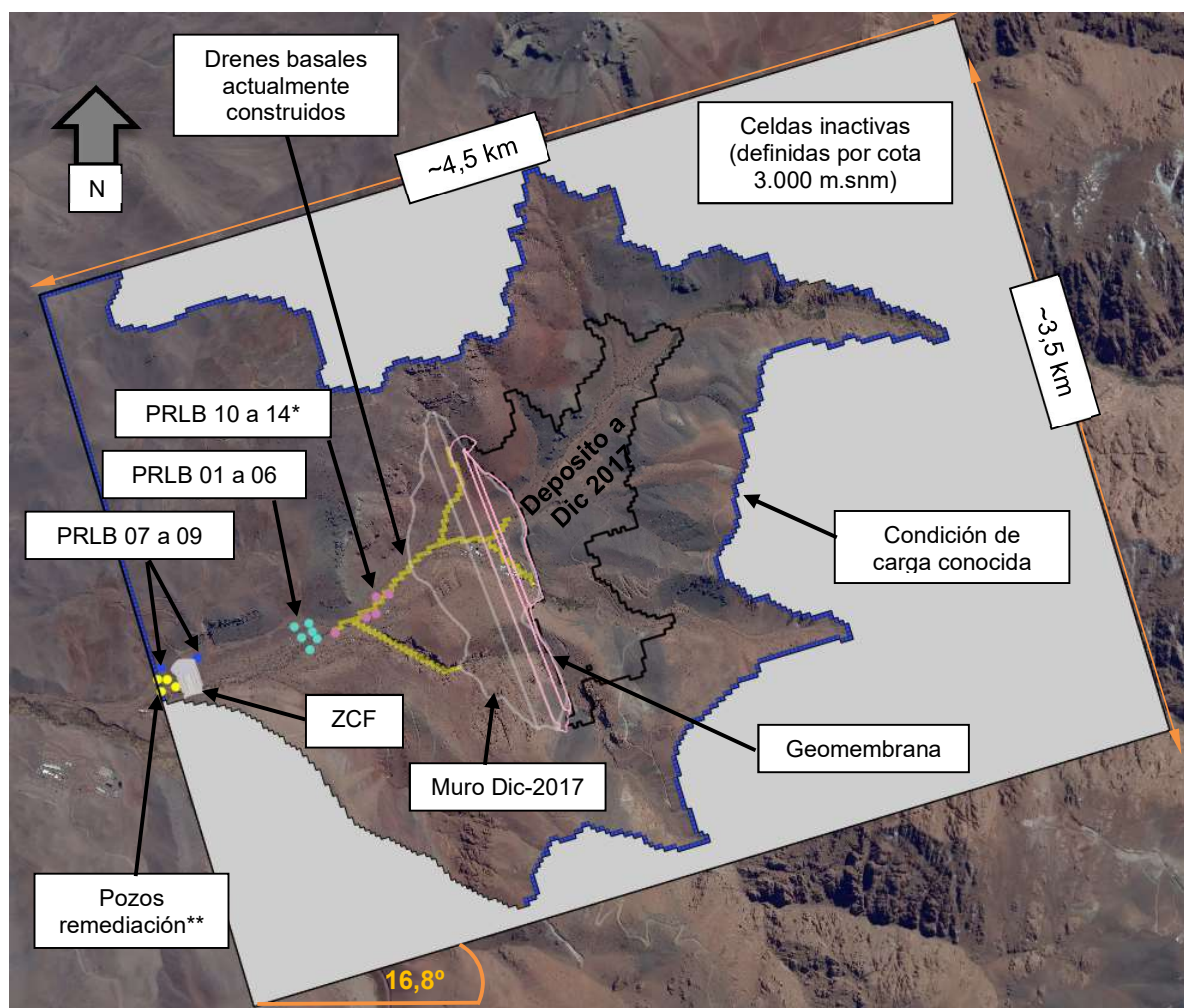
Los límites activos hacia el norte, este y sur fueron definidos considerando la cota 3.000 m.s.n.m. como límite, lo cual, si bien corresponde a una definición arbitraria, se considera razonable para simular el crecimiento actual y futuro del depósito. El límite oeste del modelo se ha definido considerando incorporar el manejo de agua que ha hecho MLCC en la quebrada La Brea para el control de filtraciones. De esta forma se busca incluir el gradiente hidráulico entre la laguna y el acuífero aguas abajo del aforador (punto terminal de los drenes basales), lo cual representa la principal fuerza motriz que ha evacuado las infiltraciones del DLLB. Considerando esto, el cierre del modelo se ha puesto en el sector de la zanja cortafuga (ZCF) y los pozos de remediación en torno a esta (excluyendo el POB-07A), ubicando este límite a una distancia aproximada de 1,78 km aguas abajo del eje del muro y a ~300 m aguas arriba de la confluencia con el río Ramadillas.

De esta forma el dominio tiene dimensiones de 4,5 km en la dirección este-oeste y 3,5 en la dirección norte-sur, cuyos límites están determinados por las siguientes coordenadas, según el Datum Geodésico WGS84 UTM Huso 19S:

Vértice SO	: 437.289,00 E; 6.885.665,00 N
Vértice SE	: 441.596,94 E; 6.886.965,64 N
Vértice NE	: 440.585,33 E; 6.890.316,26 N
Vértice NO	: 436.277,39 E; 6.889.015,62 N

El dominio ha sido rotado en 16,8° en la dirección contraria a las manecillas del reloj para orientar los ejes principales de flujo con el aluvial de la quebrada principal donde se ubica el tranque. La Figura 4-1 muestra el dominio considerado, así como las principales obras del Proyecto y las condiciones de borde más relevantes del modelo.

Figura 4-1. Dominio del modelo numérico



Fuente: Elaboración propia

Imagen satelital: Digital Globe Nov 2011

*: Pozos de bombeo nuevos, construidos durante el 2017

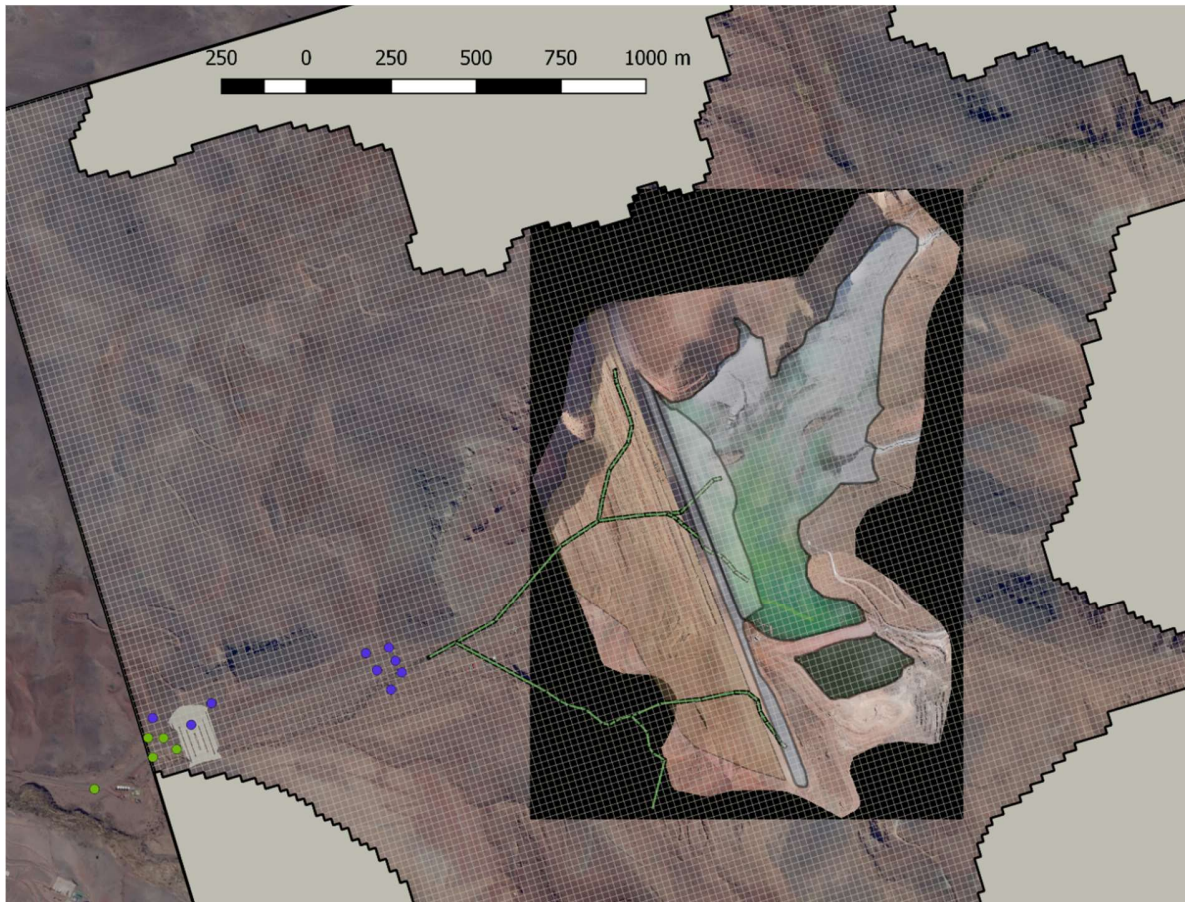
**: El pozo POB-07A parte de los pozos de remediación está fuera del dominio del modelo

4.3 Discretización espacial

Si bien MODFLOW-USG permite emplear virtualmente cualquier grilla/malla estructurada o no-estructurada para discretizar el dominio, para el presente modelo se ha implementado una grilla estructurada con celdas cuadradas de 20 m en todo el dominio, equivalente a una grilla estándar para diferencias finitas, sin incluir refinamientos. Esta subdivisión genera 175 filas y 225 columnas, lo que se traduce en 39.375 celdas por capa. La Figura 4-2 muestra una vista en planta de la grilla empleada.

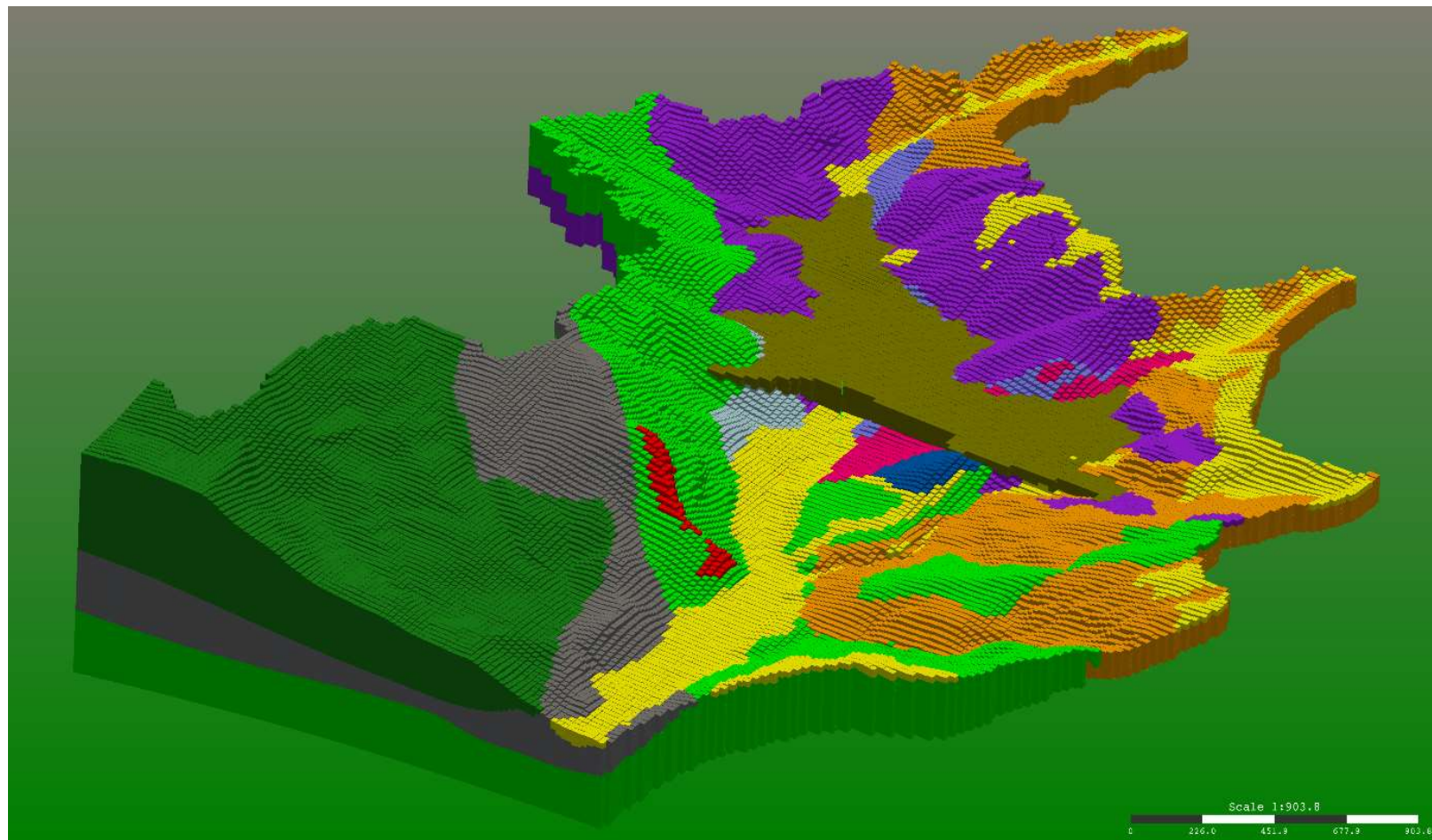
En la Figura 4-3 se presenta una vista general 3D de la geometría activa del modelo con el crecimiento del depósito de lamas a diciembre 2017, incluyendo también la distribución de propiedades hidráulicas del modelo.

Figura 4-2. Vista en planta de la grilla de 20 m empleada en el modelo numérico



Fuente: Ref. 3

Figura 4-3. Vista 3D de la grilla del modelo numérico



Fuente: Elaboración propia

4.4 Discretización temporal

En la presente actualización del modelo de infiltraciones se amplió el horizonte de simulación para abarcar el período de enero 2014 a diciembre 2017, con lo cual se simulan un total de 49 períodos de stress (períodos donde las variables forzantes se mantienen fijas). La escala temporal se mantuvo en mensual para todos los periodos simulados como transientes. En el Anexo 1 se presenta una tabla con la discretización temporal adoptada para el modelo.

Cabe mencionar que el modelo representa explícitamente el crecimiento del DLLB. Esto significa que cada vez que la simulación avanza de un mes a otro se activa parcialmente una nueva capa de relave sobre la anterior, la cual incluye la geometría (topografía de lamas) y propiedades hidráulicas de las lamas (permeabilidad y coeficiente de almacenamiento) de la capa nueva. De esta forma se representa el crecimiento histórico en 44 etapas.

4.5 Geometría y capas del modelo

Para actualizar el modelo de infiltraciones del DLLB se hace necesario aumentar la cantidad de capas numéricas de éste para así poder alojar nuevos crecimientos del depósito (históricos y futuros); este proceso en general significa una modificación mayor del modelo.

Considerando la necesidad de actualizar continuamente la herramienta, se ha decidió construir un modelo numérico de 100 capas que permita dar facilidad y continuidad al proceso de mejoramiento de éste. Lo anterior se justifica también en la necesidad de emplearlo para simular la operación proyectada del DLLB y estimar infiltraciones, las cuales son un resultado necesario para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que MLCC se encuentra desarrollando para dar continuidad a su operación. Al mismo tiempo, esto es posible gracias a las prestaciones que MODFLOW-USG incorpora.

Luego, el nuevo modelo numérico ha sido construido con un total de 100 capas de espesor variable. Las 5 inferiores (capas 96 a 100) se utilizan para alojar la geometría de las unidades hidrogeológicas definidas por Arcadis (Ref. 2), mientras que las 95 capas superiores (capas 1 a 95) se utilizan para representar exclusivamente la operación del DLLB, configurando así una herramienta de simulación integrada del sistema acuífero-depósito de relaves

El hecho de incluir estas capas adicionales permite al modelo representar explícitamente:

- El crecimiento geométrico del DLLB (tanto en espesor como en extensión lateral) de acuerdo con las batimetrías reales.
- Incluir las propiedades hidráulicas de las lamas y simular el efecto de la reducción de la permeabilidad en el tiempo, producto de la consolidación por peso propio.
- Representar la variación de cota de la laguna operacional y su ubicación en 3D.

La geometría de las capas asociadas a las unidades hidrogeológicas es obtenida desde un modelo geométrico 3D construido por Arcadis considerando la litología de los sondeos/pozos perforados hasta el año 2015 de acuerdo a lo descrito en Ref. 2, mientras que la geometría de las capas destinadas para el relave proviene de las batimetrías históricas medidas por MLCC.

Se debe mencionar que producto de la perforación de nuevos pozos de remediación durante el año 2016 se tiene nueva información litológica. Para esta actualización se utilizó dicha información para modificar localmente el modelo numérico corrigiendo los espesores asociados a la unidad aluvial (capa 96) en las inmediaciones del muro del DLLB, donde se ubican los nuevos pozos: PRLB 10 a 14 y nuevos piezómetros (PZLB-05, PZLB-06, etc.)

En la presente actualización se modelan un total de 44 etapas de crecimiento, con esto se utilizan las capas 52 a 95 del modelo numérico. Las capas 1 a 51 quedan disponibles para simular crecimientos futuros o para usarse en posteriores actualizaciones/mejoramientos del modelo con datos reales.

Al inicio de la simulación estas 44 capas se encuentran completamente inactivas y al momento de empezar la depositación (May 2014 a Dic 2017) son activadas de forma parcial (sólo en las celdas donde hay lamas/laguna) y secuencial (dependiendo del mes que se esté simulando). Para efectuar la activación de capas se utiliza el paquete TIB (*Transient IBOUND*) de MODFLOW-USG (Panday y otros, 2013) el cual permite desactivar y activar partes del dominio en el tiempo.

La Tabla 4-1 resume las características principales de las capas configuradas en el modelo actualizado, incluyendo la información batimétrica considerada en las capas que representan el depósito.

Tabla 4-1 Capas del modelo numérico y correspondencia con depositaciones del DLLB

Capa Modelo	Tipo	Mes	Fuente	Observación
52	Batimetría	dic-17	Geomonitoring	Batimetría 27/Dic/2017
53	Batimetría	nov-17	Geomonitoring	Batimetría 05/Dic/2017
54	Batimetría	oct-17	<i>Arcadis</i>	<i>Interpolación entre Sep/2017 y Nov/2017</i>
55	Batimetría	sept-17	Geomonitoring	Batimetría 28/Sep/2017
56	Batimetría	ago-17	Geomonitoring	Batimetría 28/Ago/2017
57	Batimetría	jul-17	Geomonitoring	Batimetría 04/Ago/2017
58	Batimetría	jun-17	Geomonitoring	Batimetría 29/Jun/2017
59	Batimetría	may-17	<i>Arcadis</i>	<i>Interpolación entre Abr/2017 y Jun/2017</i>
60	Batimetría	abr-17	Geomonitoring	Batimetría 25/Abr/2017
61	Batimetría	mar-17	<i>Arcadis</i>	<i>Interpolación entre Feb/2017 y Abr/2017</i>
62	Batimetría	feb-17	Geomonitoring	Batimetría 25/Feb/2017
63	Batimetría	ene-17	<i>Arcadis</i>	<i>Interpolación entre Dic/2016 y Feb/2017</i>
64	Batimetría	dic-16	Geomonitoring	Batimetría 30/Dic/2016
65	Batimetría	nov-16	Geomonitoring	Batimetría 29/Nov/2016
66	Batimetría	oct-16	INTOSIM	Batimetría 17/Oct/2016
67	Batimetría	sept-16	INTOSIM	Batimetría 29/Sep/2016
68	Batimetría	ago-16	INTOSIM	Batimetría 31/Ago/2016
69	Batimetría	jul-16	INTOSIM	Batimetría 27/Jul/2016
70	Batimetría	jun-16	INTOSIM	Batimetría 29/Jun/2016
71	Batimetría	may-16	INTOSIM	Batimetría 07/Jun/2016
72	Batimetría	abr-16	INTOSIM	Batimetría 14/Abr/2016
73	Batimetría	mar-16	INTOSIM	Batimetría 31/Mar/2016
74	Batimetría	feb-16	INTOSIM	Batimetría 02/Mar/2016
75	Batimetría	ene-16	INTOSIM	Batimetría 01/Ene/2016
76	Batimetría	dic-15	INTOSIM	Batimetría 29/Dic/2015
77	Batimetría	nov-15	Geosoluciones	Batimetría 19/Nov/2015
78	Batimetría	oct-15	Geosoluciones	Batimetría 15/Oct/2015
79	Batimetría	sept-15	Geosoluciones	Batimetría 30/Sep/2015
80	Batimetría	ago-15	Geosoluciones	Batimetría 02/Sep/2015
81	Batimetría	jul-15	Geosoluciones	Batimetría 18/Ago/2015
82	Batimetría	jun-15	<i>Arcadis</i>	<i>Interpolación entre May y Jul 2015</i>
83	Batimetría	may-15	Geosoluciones	Batimetría 27/May/2015

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Capa Modelo	Tipo	Mes	Fuente	Observación
84	Batimetría	abr-15	Geosoluciones	Batimetría 29/Abr/2015
85	Batimetría	mar-15	Geosoluciones	Batimetría 12/Mar/2015
86	Batimetría	feb-15	Geosoluciones	Batimetría del 24/Feb/2015
87	Batimetría	ene-15	Geosoluciones	Batimetría del 04/Feb/2015
88	Batimetría	dic-14	Geosoluciones	Batimetría del 12/Ene/2015
89	Batimetría	nov-14	Arcadis	<i>Extrapolación (cota plana) basada en el tonelaje depositado</i>
90	Batimetría	oct-14	Arcadis	
91	Batimetría	sept-14	Arcadis	
92	Batimetría	ago-14	Arcadis	
93	Batimetría	jul-14	Arcadis	
94	Batimetría	jun-14	Arcadis	
95	Batimetría	may-14	Arcadis	
96	Hidrogeología	Capa 1	Arcadis	Modelo 3D Leapfrog Hydro
97	Hidrogeología	Capa 2	Arcadis	Modelo 3D Leapfrog Hydro
98	Hidrogeología	Capa 3	Arcadis	Modelo 3D Leapfrog Hydro
99	Hidrogeología	Capa 4	Arcadis	Modelo 3D Leapfrog Hydro
100	Hidrogeología	Capa 5	Arcadis	Modelo 3D Leapfrog Hydro

Fuente: Elaboración propia

4.6 Caracterización de las lamas depositadas

El modelo de infiltraciones reportado en Ref. 2 y Ref. 3 emplea una caracterización geotécnica e hidráulica de las lamas que provenía desde los ensayos hechos durante la ingeniería y de literatura técnica especializada, los cuales difieren de las lamas realmente depositadas.

Como parte de las recomendaciones indicadas en la última actualización del modelo de infiltraciones, se solicitó a MLCC la obtención y análisis de muestras de lamas provenientes de la operación real del DLLB con el fin de mejorar el modelo.

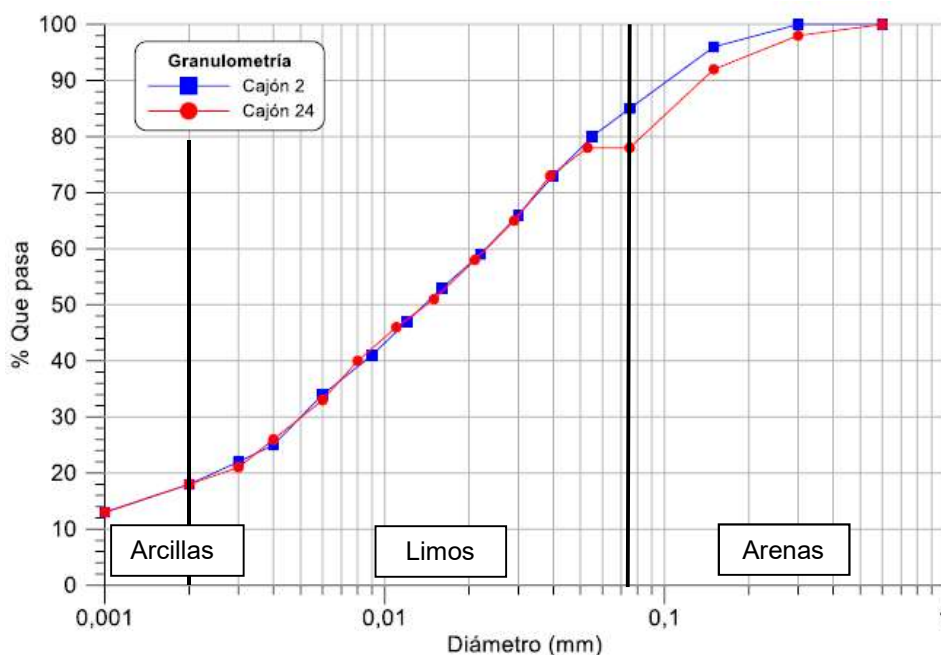
En Noviembre 2016 MLCC obtuvo muestras desde el Cajón 2 y Cajón 24 del sistema de transporte de relaves las cuales fueron analizadas por solicitud de Arcadis por el laboratorio IGEX y son reportadas en Ref. 4.

A continuación se presenta un resumen de las principales características de éste y las consideraciones tomadas para mejorar el proceso de consolidación simulado por el modelo (función K vs tiempo).

4.6.1 Granulometría

La Figura 4-4 presenta la curva granulométrica de las muestras tomadas para el Cajón 2 y Cajón 24. Se observa un porcentaje de finos que varía entre 78 a 85% (fracción bajo malla #200). La clasificación USCS indica que se trata de un material tipo CL-ML (predominantemente limo). Adicionalmente, la caracterización de las lamas indica una densidad de sólidos (G_s) entre 2,82 a 2,84 t/m³.

Figura 4-4: Resumen de resultados ensayos granulométricos en lamas



Fuente: Ref. 4

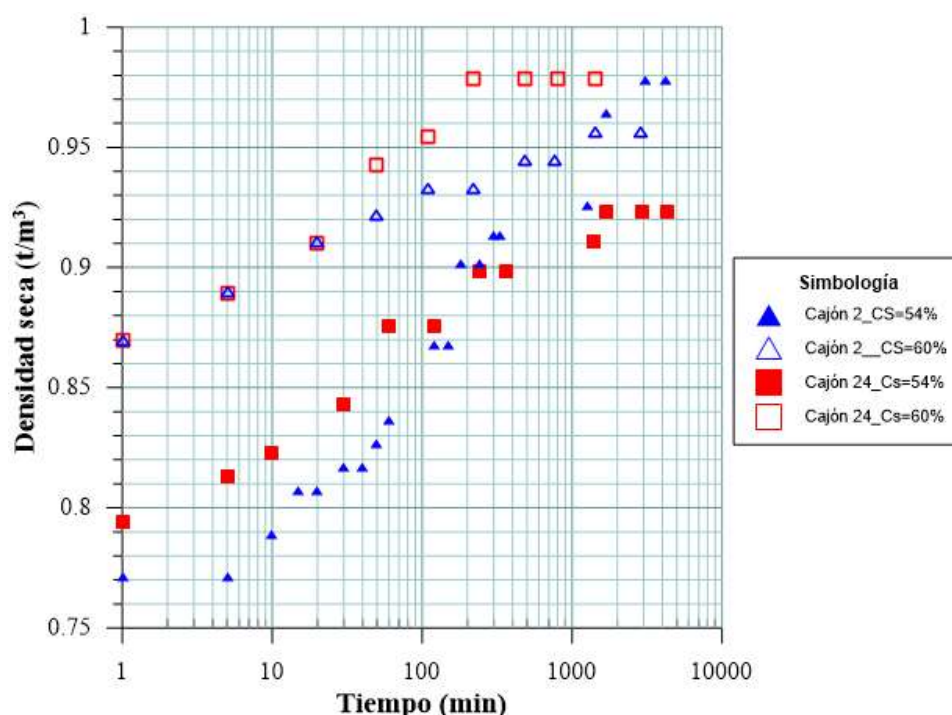
4.6.2 Ensayos de Sedimentación y Consolidación

Para estimar la densidad que alcanzan las lamas una vez depositadas en la cubeta de La Brea y analizar la variación del índice de vacíos en profundidad (en función de la carga aplicada), se ejecutaron ensayos de sedimentación y consolidación sobre 2 muestras de relaves distintas (Ref. 4).

Los ensayos de sedimentación fueron ejecutados sobre las muestras Cajón 2 y Cajón 24, utilizando 2 concentraciones de sólidos (C_s) iniciales diferentes. Los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio se muestran en la Figura 4-5.

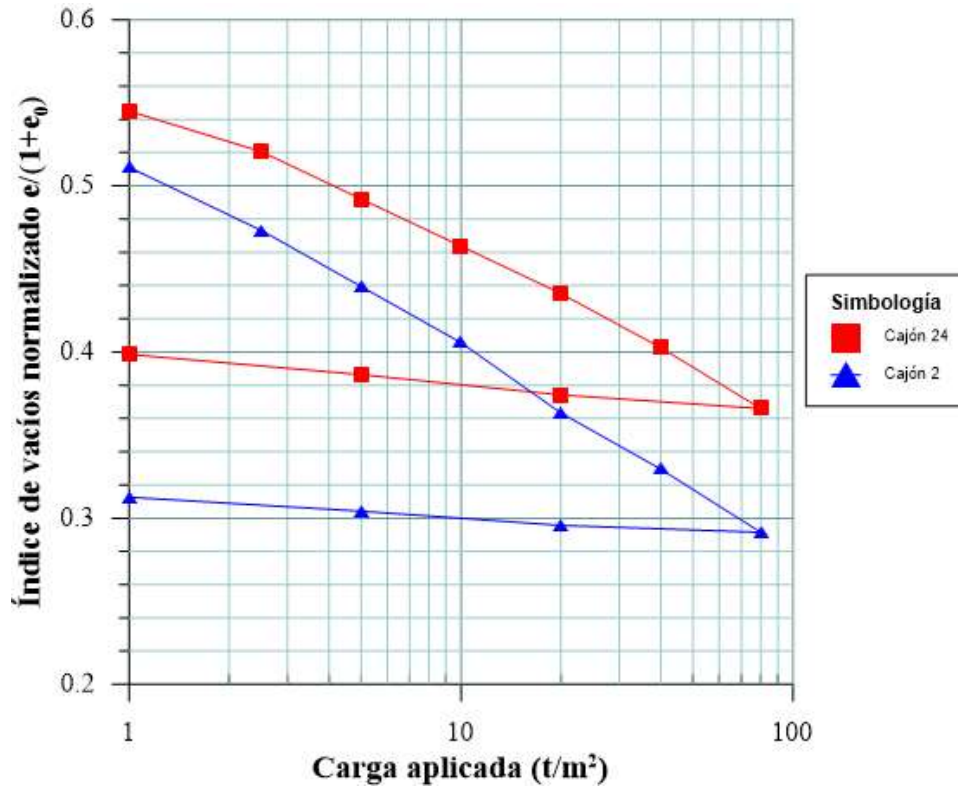
Según indican los resultados de los ensayos de sedimentación, de forma posterior a 1.500 minutos (25 horas) las mediciones de densidad seca se estabilizaron. Solo la muestra del Cajón 24 con C_s igual a 60% se estabilizó luego de 200 minutos (3,3 horas) de iniciado el ensayo. Los resultados finales muestran que la densidad seca de las 4 pruebas realizadas se alcanzaron máximos comprendidos entre $0,92 \text{ t/m}^3$ y $0,98 \text{ t/m}^3$.

Figura 4-5: Resumen de resultados pruebas de sedimentación en lamas



Fuente: Ref. 6 con datos de Ref. 4

Los resultados de los ensayos de consolidación edométricos se presentan en la Figura 4-6, donde se observa que el comportamiento de ambos materiales es similar para los tramos de carga y descarga. Los parámetros C_c y C_r extraídos desde el ensayo de consolidación se resumen en la Tabla 4-2.

Figura 4-6: Resumen de resultados ensayos de consolidación edométrica en lamas

Fuente: Ref. 6 con datos de Ref. 4

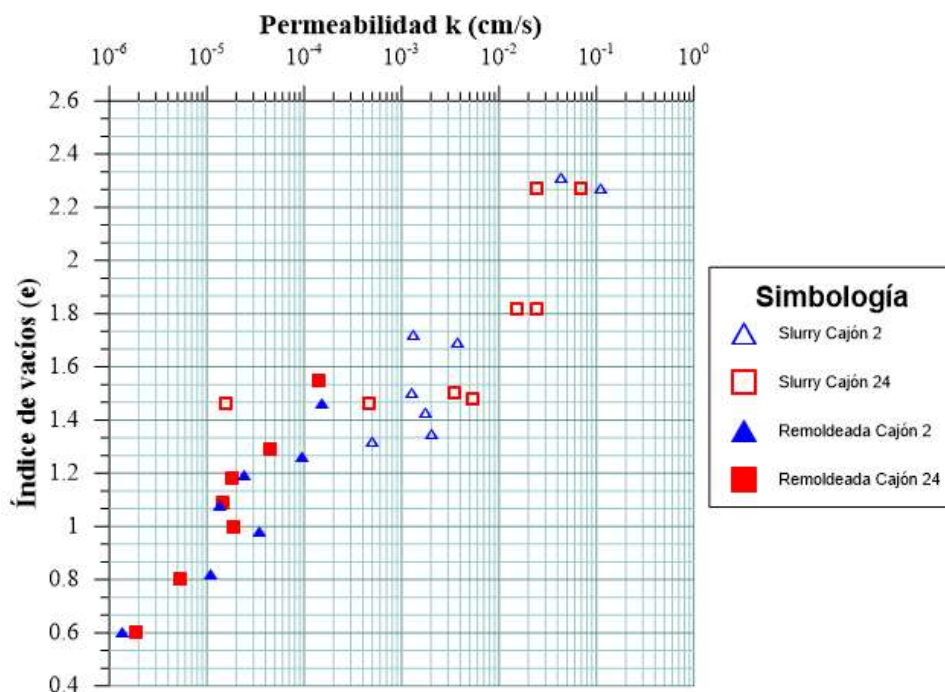
Tabla 4-2: Resultados índices de C_c y C_r de los ensayos de consolidación

Pendiente	Muestra	
	Cajón 2	Cajón 24
Curva virgen (C_c)	0,299	0,299
Curva de recompresión (C_r)	0,033	0,05

Fuente: Ref. 6 con datos de Ref. 4

4.6.3 Ensayos de Permeabilidad

Para estimar la variación de la permeabilidad en función del índice de vacíos se efectuaron una serie de ensayos de permeabilidad con carga constante y variable en laboratorio (Ref. 4). Las pruebas fueron realizadas sobre material remoldeado, con distintos índices de vacíos iniciales. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Figura 4-7.

Figura 4-7: Resultados ensayos de permeabilidad en lamas en función del índice de vacíos

Fuente: Ref. 6 con datos de Ref. 4

4.6.4 Análisis de densidad y permeabilidad en función de la profundidad

Para caracterizar hidráulicamente las lamas, en primera instancia se estimó la densidad seca equivalente de los relaves en función del volumen depositado. Como datos de entrada se utilizaron las mediciones de lamas que ingresan al depósito (en masa) y los volúmenes de material almacenado en la cubeta, considerando los datos provenientes del registro diario de parámetros operacionales, los levantamientos batimétricos históricos y la topografía del terreno natural. Información provista por MLCC.

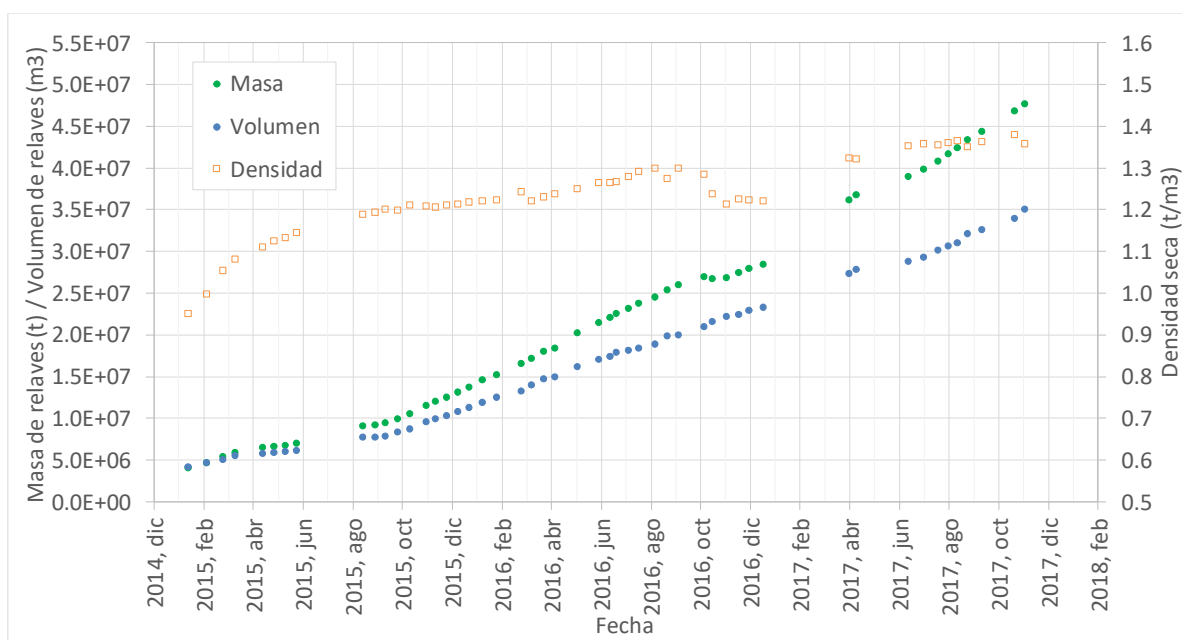
Con los antecedentes descritos anteriormente, se calculó la densidad seca promedio del depósito en función del tiempo, calculando la razón entre la masa y el volumen de relaves almacenados para cada una de las fechas en que se dispone de información batimétrica. Los valores de densidad obtenidos a partir de esta metodología se presentan en la Tabla 4-3, mientras que en la Figura 4-8 se muestran gráficamente tales datos.

Tabla 4-3: Masa, volumen y densidad seca promedio (datos históricos del DLLB)

Fecha	Masa (t)	Volumen (m³)	Densidad seca (t/m³)	Fecha	Masa (t)	Volumen (m³)	Densidad seca (t/m³)
12-01-2015	4.032.629	4.236.973	0,95	07-06-2016	21.453.716	16.980.351	1,26
04-02-2015	4.637.185	4.653.294	1,00	21-06-2016	22.088.638	17.463.826	1,26
24-02-2015	5.348.378	5.078.868	1,05	29-06-2016	22.600.184	17.846.533	1,27
12-03-2015	5.934.339	5.491.609	1,08	14-07-2016	23.201.751	18.146.958	1,28
15-04-2015	6.445.322	5.803.104	1,11	27-07-2016	23.725.656	18.382.972	1,29

Fecha	Masa (t)	Volumen (m ³)	Densidad seca (t/m ³)	Fecha	Masa (t)	Volumen (m ³)	Densidad seca (t/m ³)
29-04-2015	6.643.257	5.900.799	1,13	17-08-2016	24.567.385	18.909.366	1,30
13-05-2015	6.797.462	6.004.233	1,13	01-09-2016	25.357.093	19.892.023	1,27
27-05-2015	6.998.130	6.118.845	1,14	15-09-2016	25.961.109	19.975.132	1,30
18-08-2015	9.117.934	7.677.666	1,19	17-10-2016	26.958.804	20.995.989	1,28
02-09-2015	9.235.696	7.743.045	1,19	27-10-2016	26.683.744	21.546.606	1,24
15-09-2015	9.426.951	7.844.433	1,20	14-11-2016	26.882.251	22.157.840	1,21
30-09-2015	9.955.123	8.309.286	1,20	29-11-2016	27.449.951	22.420.827	1,22
15-10-2015	10.596.930	8.757.170	1,21	12-12-2016	27.983.627	22.866.932	1,22
05-11-2015	11.511.443	9.530.744	1,21	30-12-2016	28.486.972	23.341.125	1,22
17-11-2015	11.968.122	9.919.100	1,21	15-04-2017	36.119.596	27.308.299	1,32
30-11-2015	12.459.112	10.300.200	1,21	25-04-2017	36.756.789	27.831.059	1,32
14-12-2015	13.169.472	10.849.331	1,21	29-06-2017	38.929.559	28.801.945	1,35
29-12-2015	13.747.113	11.296.009	1,22	18-07-2017	39.773.765	29.301.264	1,36
14-01-2016	14.546.938	11.921.442	1,22	04-08-2017	40.778.960	30.100.060	1,35
01-02-2016	15.254.238	12.482.892	1,22	17-08-2017	41.637.499	30.590.668	1,36
02-03-2016	16.494.182	13.285.052	1,24	28-08-2017	42.429.270	31.062.014	1,37
15-03-2016	17.133.554	14.035.014	1,22	11-09-2017	43.327.158	32.093.985	1,35
31-03-2016	18.055.890	14.673.446	1,23	28-09-2017	44.384.258	32.561.919	1,36
13-04-2016	18.440.037	14.912.854	1,24	08-11-2017	46.828.912	33.958.789	1,38
11-05-2016	20.162.722	16.125.798	1,25	21-11-2017	47.639.913	35.077.830	1,36

Fuente: Ref. 6 con datos operacionales de MLCC

Figura 4-8: Masa, volumen y densidad seca de los relaves almacenados en el tiempo

Fuente: Ref. 6 con datos de MLCC

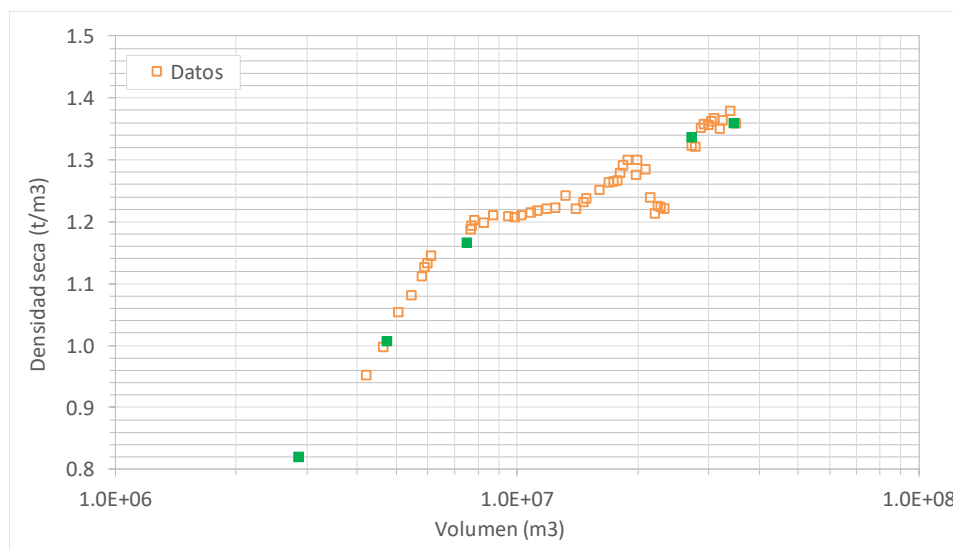
De la Figura 4-8 se desprende que la densidad seca promedio del depósito La Brea ha presentado un aumento sostenido en el tiempo, alcanzando valores cercanos a $1,4 \text{ t/m}^3$ a diciembre de 2017. Adicionalmente, al revisar los resultados obtenidos para los primeros 7 meses de operación (hasta febrero de 2015), se obtuvo que la densidad seca media del depósito fue inferior a $1,0 \text{ t/m}^3$, lo que coincide con los resultados obtenidos en las pruebas de sedimentación.

Una vez obtenida la curva de densidad media versus volumen de crecimiento del depósito, a partir de los resultados de los ensayos de consolidación presentados en el acápite 4.6.2, se estimó la variación de densidad en función de la profundidad de relaves almacenados. La metodología desarrollada consideró la discretización en capas de la cubeta, definiendo un estrato superficial de material suelto que se encuentra en proceso de sedimentación y una serie estratos de espesor unitario sobre los que se determinó su índice de vacíos y densidad seca utilizando las curvas de consolidación (ver Figura 4-6). De manera conservadora, el modelo consideró que los relaves del depósito se encuentran completamente saturados.

Como dato inicial del modelo, se utilizaron las propiedades del material tipo *slurry* para caracterizar el estrato de suelo somero y obtener la sobrecarga que este material ejerce sobre el suelo subyacente. Posteriormente, una vez obtenida la sobrecarga inicial, se evaluó sobre cada estrato la tensión vertical efectiva, para así estimar el índice de vacíos de cada capa y su correspondiente densidad seca (mediante el uso de las curvas de tensión vertical efectiva e índice de vacíos obtenidos de los ensayos de consolidación).

Para calibrar los resultados del modelo desarrollado, se comparó la densidad seca de relaves resultante del análisis de batimetrías y datos operacionales (ver Figura 4-8) con el valor medio de densidad del modelo de capas. Los resultados de esta calibración se indican en color verde en la Figura 4-9.

Figura 4-9: Ajuste de curva de densidad a la data histórica

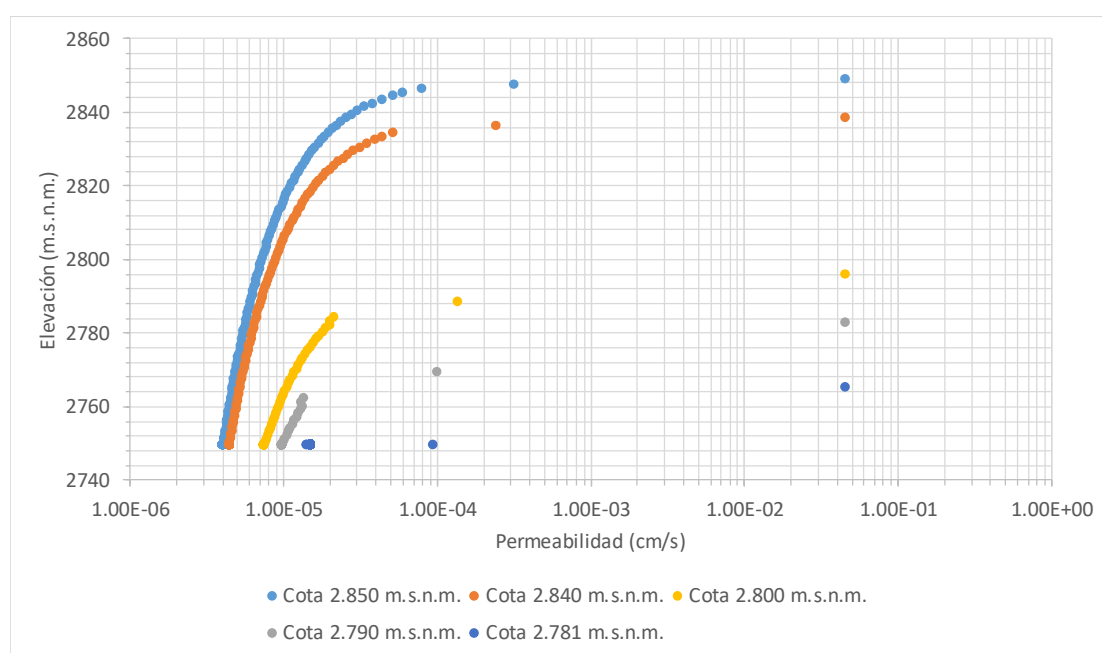


Fuente: Ref. 6

Finalmente, una vez calibrado el modelo, se determinó la relación existente entre la permeabilidad y la elevación del depósito (para distintas fases de crecimiento del embalse). Esta relación fue estimada a partir del análisis cruzado entre los gráficos de conductividad hidráulica (presentados en el acápite 4.6.3) y las curvas calibradas de densidad en profundidad del modelo de capas.

Al considerar el ajuste exponencial de los datos de laboratorio presentados en la Figura 4-7, se determinó el gráfico de permeabilidad versus profundidad para 5 etapas de crecimiento del depósito se muestra en la Figura 4-10. Los resultados muestran una gran variación de la conductividad hidráulica en la superficie de la cubeta para cada etapa analizada, observándose cambios de hasta 3 órdenes de magnitud en los primeros 10 m de profundidad para la curva de crecimiento con cota 2.850 m.s.n.m. Esta variación estaría condicionada por el bajo índice de vacíos del material superficial, que facilitaría el flujo de agua a través de este estrato. Dependiendo de la curva considerada, los valores de permeabilidad en profundidad bajo el estrato suelto de lamas serían del orden de los $3\text{E-}6$ cm/s y $1\text{E-}4$ cm/s.

Figura 4-10: Curvas de densidad versus elevación del depósito para distintos estados de operación



Fuente: Ref. 6

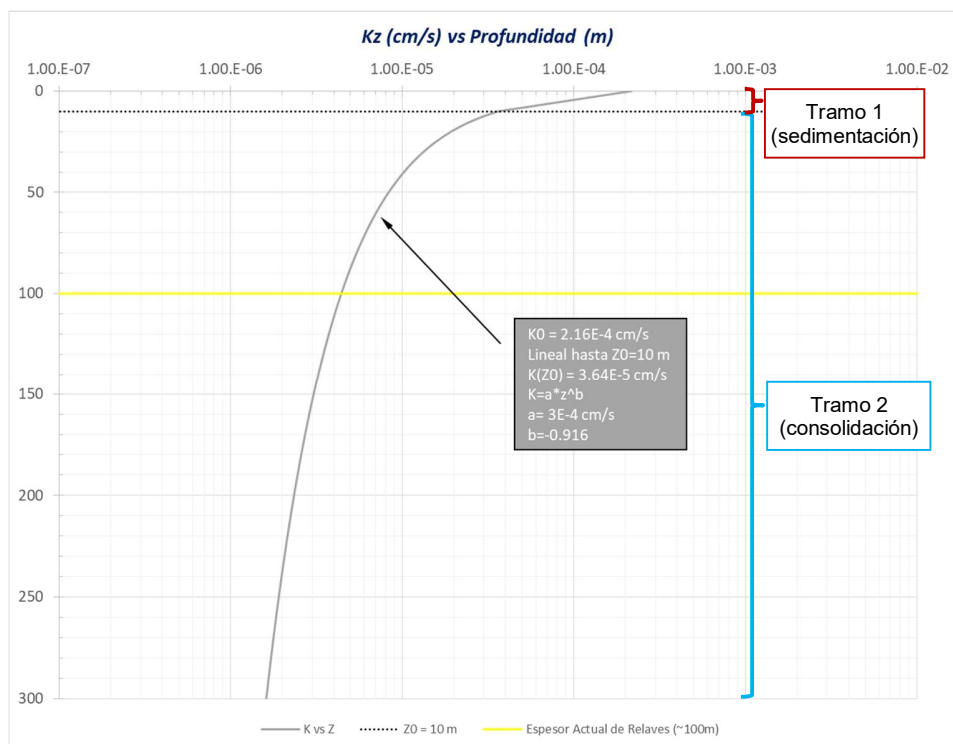
A partir de estos resultados se definió una curva única para todas las etapas de crecimiento, que permite representar la variación de permeabilidad de las lamas en profundidad. Esta curva fue obtenida empalmando los gráficos de permeabilidad versus elevación anteriores y está dividida en 2 tramos:

- **Tramo 1 (sedimentación):** Busca representar la permeabilidad del material en estado suelto que se encuentra superficialmente en la cubeta (sedimentación). Se considera que este tramo tiene un espesor variable (Z_0) de 5 a 20 m (dependiendo del tonelaje depositado) y se asume una variación lineal de la permeabilidad desde el valor inicial (en superficie) hasta empalmar con el inicio del tramo 2 (modelo de consolidación evaluado en Z_0).
- **Tramo 2 (consolidación):** La variación de la permeabilidad en profundidad de este tramo fue definida mediante un modelo de ajuste potencial: $K = a \cdot Z^b$, donde Z es la profundidad del relave y a y b son parámetros de ajuste. Para esto se empalmaron todas las curvas calculadas previamente obteniéndose los siguientes parámetros: $a = 3\text{E-}4$ cm/s y $b = -0.916$ para a curva unificada.

La Figura 4-11 presenta la curva de permeabilidad versus profundidad construida, asumiendo una profundidad umbral de 10 m y un K en superficie (K_0) de $2,16\text{E-}4$ cm/s ($0,187$ m/d), el cual corresponde

al valor medio obtenido para las lamas durante la calibración del modelo de infiltraciones (ver punto 5.3.1.2). Cabe mencionar que de acuerdo a las pruebas de laboratorio, el material de suelo tendría permeabilidades del orden de $1\text{E-}4$ cm/s ($0,086$ m/d) a $1\text{E-}1$ cm/s ($86,4$ m/d) (Ref. 4).

Figura 4-11: Ajuste de permeabilidad en profundidad



Fuente: modificado de Ref. 6

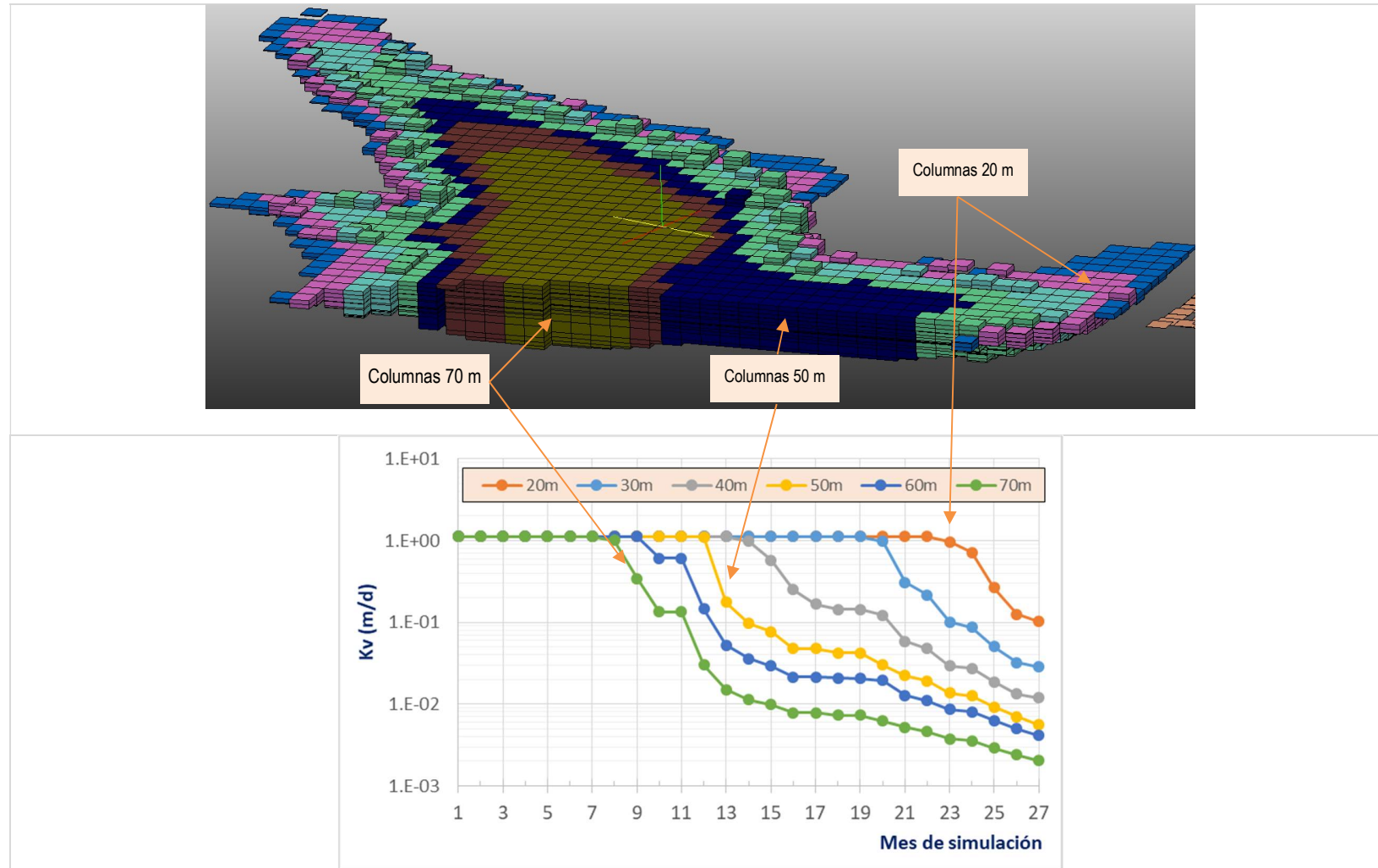
4.6.5 Implementación de la consolidación en el modelo numérico

El enfoque adoptado para modelar las infiltraciones incluye la modificación (reducción) de la permeabilidad de las lamas en el tiempo. Esto se hace combinando la curva de permeabilidad en profundidad con el crecimiento del depósito (batimetrías).

Por simplicidad, en el modelo original (Ref. 2 y Ref. 3) la construcción y asignación de las funciones de reducción de permeabilidad en el tiempo se basaba en una agrupación por columnas de espesor similar, clasificándolas en rangos de 10 m. Para cada grupo de columnas se empleaba la columna promedio para hacer el seguimiento del espesor en el tiempo, y en base a ésta se definía la curva de K vs tiempo de toda la clase. Si bien se consideraba la variabilidad en el tiempo, con este enfoque se imponía que la permeabilidad de toda la columna fuera homogénea, es decir, la permeabilidad en la base era igual que en la superficie para un instante de tiempo definido. La Figura 4-15 muestra las columnas definidas y las curvas de K vs tiempo consideradas para el modelo reportado en la Ref. 2.

Finalmente, las series de K vs tiempo eran simuladas en el modelo usando el paquete TVM (*Time-Variant Materials Package*) de MODFLOW-USG.

Figura 4-12: Curvas de variación de permeabilidad de lamas (K_v) en el tiempo para modelo de la Ref. 2



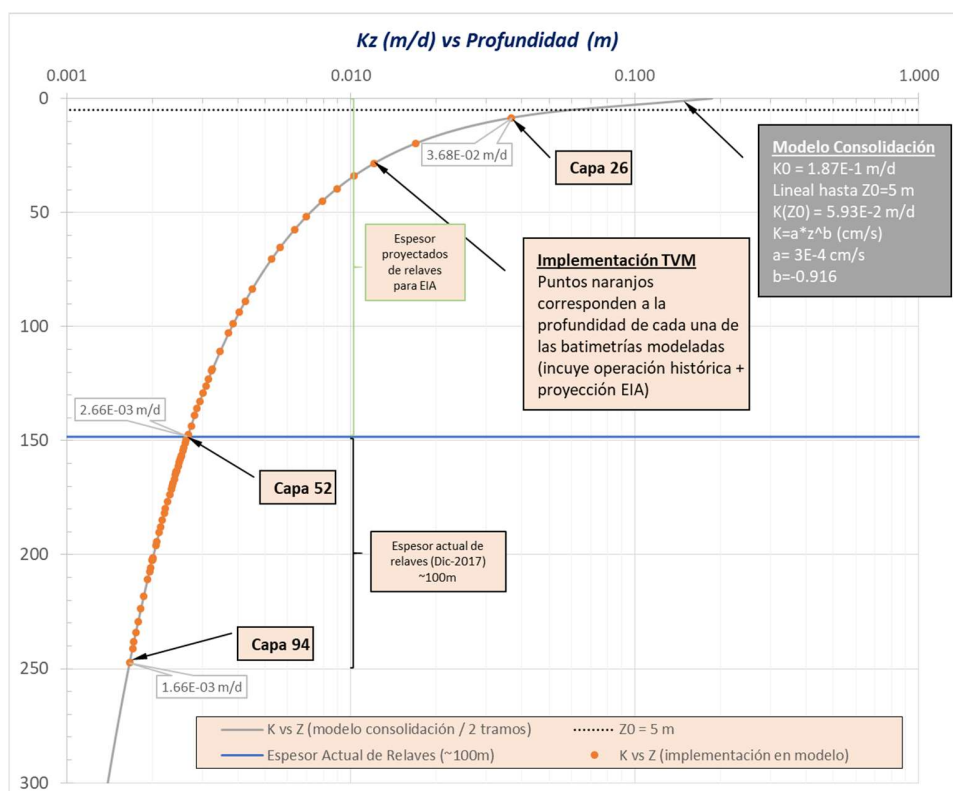
Fuente: elaboración propia con datos de Ref. 2

Para la presente actualización se consideró mejorar la forma en que se construyen las curvas de permeabilidad en el tiempo, generalizando su aplicación. La nueva implementación hace seguimiento a cada bloque (celda) de lamas en el tiempo y espacio de forma independiente, evitando el uso de una clasificación por espesor de columna y permitiendo que la base de la columna de lamas tenga una permeabilidad diferente a la parte superior. De esta forma se permite que exista infiltración en la dirección vertical y al mismo tiempo no se limita el movimiento del agua lateralmente dentro del relave como en el enfoque anterior.

La implementación desarrollada consistió en desarrollar un código Fortran que escribiera directamente el paquete TVM con las permeabilidades por celdas a partir de la información de la curva de permeabilidad en profundidad construida en el punto anterior y la geometría de las celdas (obtenida desde los paquetes MODFLOW correspondientes). En esencia, en base a los 44 crecimientos batimétricos incorporados al modelo, se construyen columnas con celdas de espesores equivalentes a la diferencia de cota entre batimetrías. En base a estos espesores, transformado a profundidad de columna se calcula el K de cada una de ellas siguiendo la relación Kz vs Z desarrollada. Para estimar la permeabilidad horizontal del relave, se consideró anisotropía de $K_x/K_z = 10$.

La Figura 4-13 muestra la verificación hecha a la implementación desarrollada. Para esto se comparan la curva de K vs Z generada con el modelo potencial descrito previamente (curva gris) y lo implementado en el paquete TVM para la fila 80 y columna 98 del modelo considerando el crecimiento histórico (capas 52 a 94) y el crecimiento proyectado (capas 26 a 51), que es utilizado para simular la infiltración futura.

Figura 4-13: Comparación entre curva Kz vs Z (modelo de consolidación) e implementación en modelo numérico



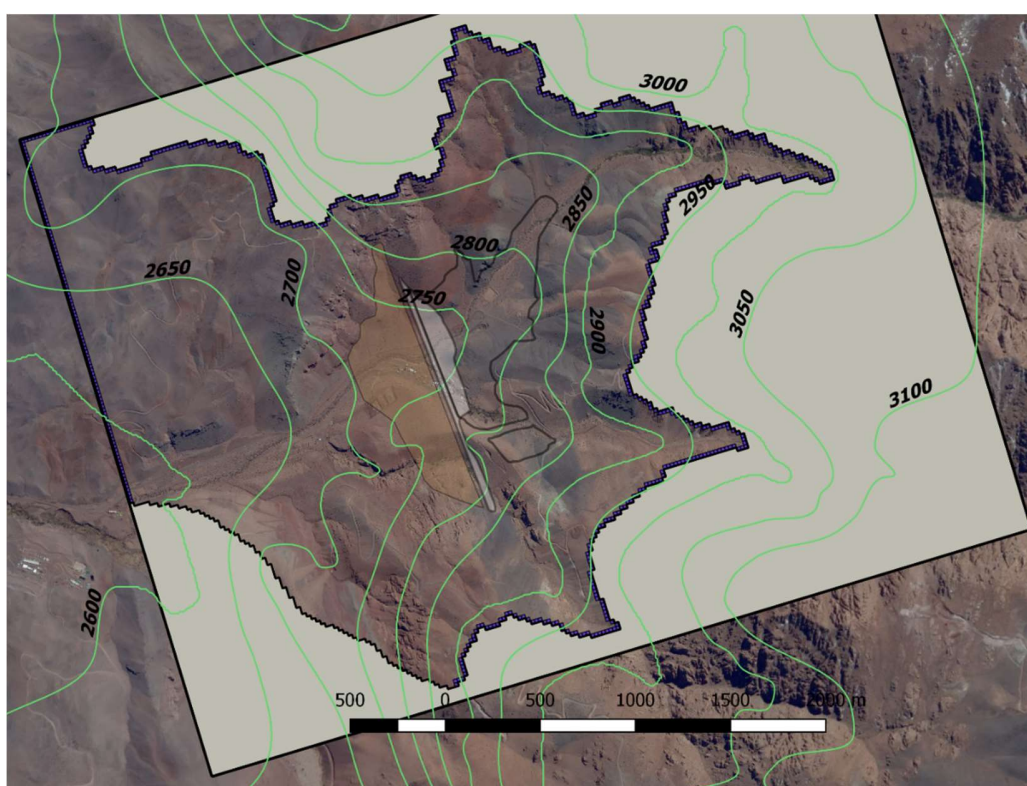
Fuente: elaboración propia

4.7 Condiciones de borde

4.7.1 Recarga y descarga natural

La recarga y descarga de aguas subterráneas al dominio del modelo actualizado fueron incorporados en función de la piezometría desarrollada en el modelo conceptual, al igual que en el modelo original. La representación de estos flujos se hace también mediante el paquete CHD (Harbaugh, 2005) de MODFLOW-USG. La Figura 4-14 ejemplifica la distribución general de las celdas CHD en la capa 97 del modelo actualizado (celdas de color azul), junto a las curvas equipotenciales consideradas (líneas verdes).

Figura 4-14. Celdas usadas para ingresar la recarga/descarga subterránea mediante una condición de borde de altura conocida



Fuente: Ref. 2

4.7.2 Extracciones de aguas subterráneas

La Figura 4-15 muestra la ubicación de los pozos de bombeo considerados por el modelo:

- Pozos REM : BRW-01, BRW-02, POB-08B, PBB-01
- Pozos PRLB (zona central) : PRLB 1 a 6
- Pozos PRLB (zona cortafuga) : PRLB 7 a 9
- Pozos PRLB (zona cercana al muro) : PRLB 10 a 14 (nuevos pozos incluidos en el modelo).

Para representar la extracción realizada por ellos se utiliza el paquete WEL (Harbaugh, 2005) de MODFLOW-USG. Para la simulación con paquete WEL se ha activado la opción de reducción automática del bombeo que entrega MODFLOW-USG, la cual aplica cuando el espesor saturado de celda es inferior a un 1%.

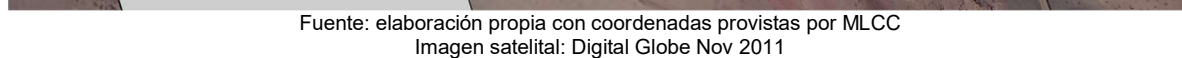
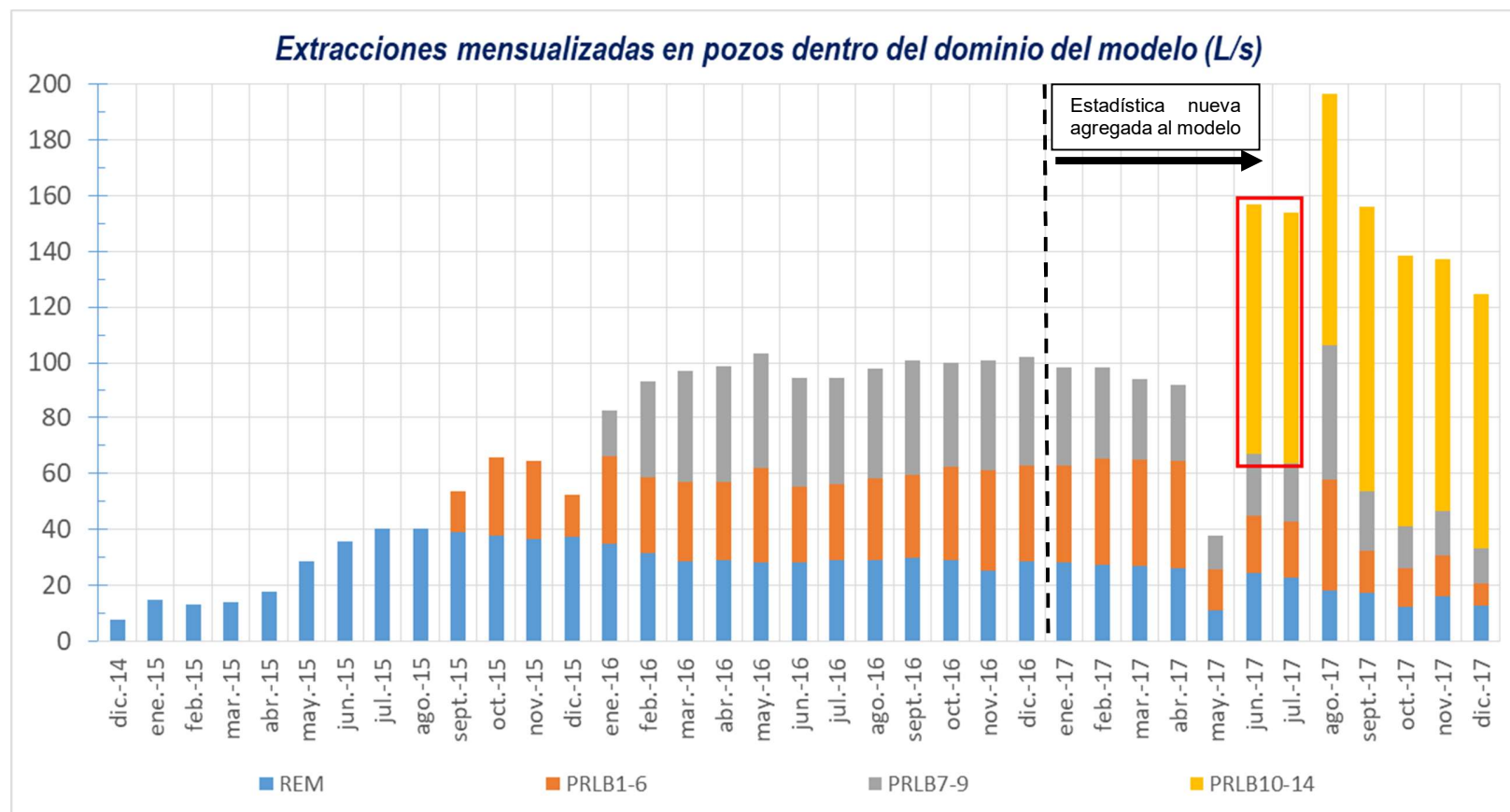


Figura 4-16. Caudal de bombeo para los pozos incluidos dentro del dominio del modelo



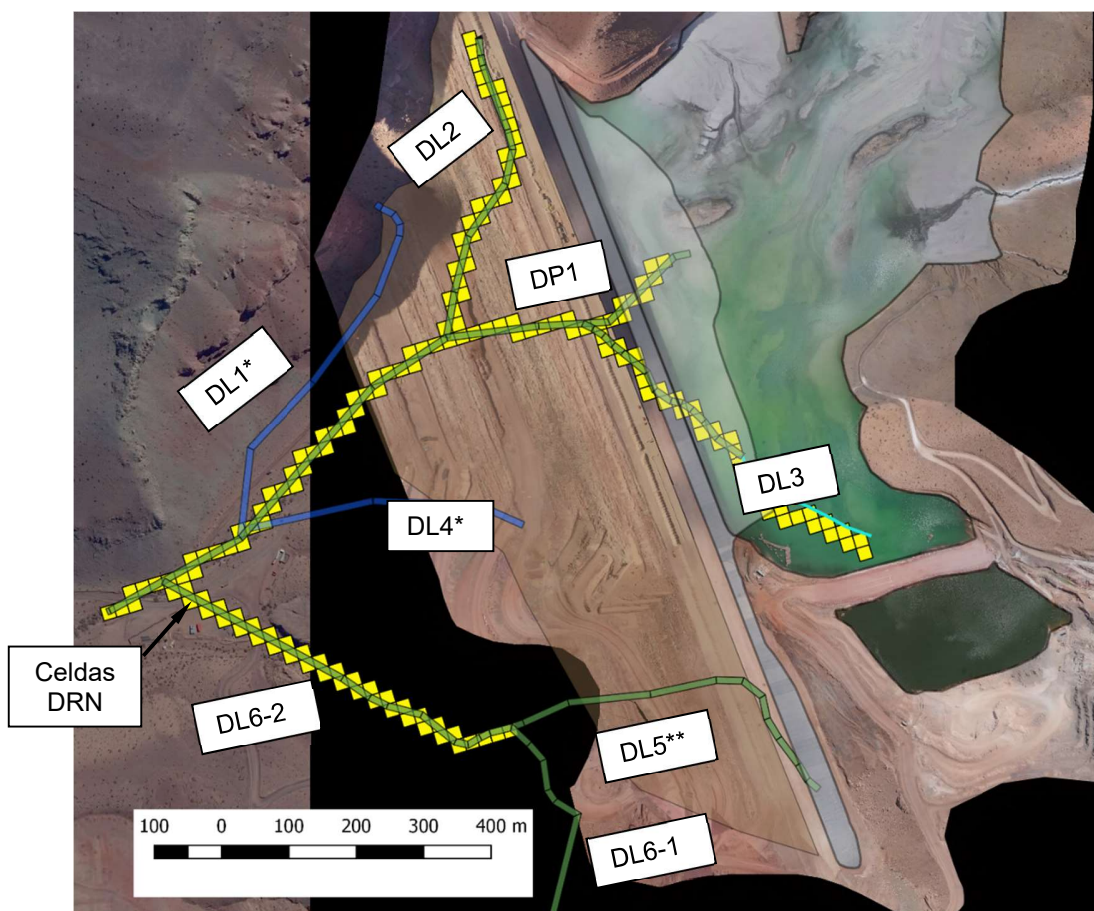
Fuente: elaboración propia con datos provistos por MLCC

Nota: La estadística de pozos PRLB 10 a 14 para junio y julio 2017 (recuadro rojo) no estaba disponible, por lo que se repitió la de agosto 2017. El inicio del bombeo de estos pozos quedó registrado en los cambios de nivel de los nuevos piezómetros cercanos al muro (ejemplo: PZLB-05)

4.7.3 Sistema de drenaje del muro del DLLB

La Figura 4-17 muestra la distribución de las celdas (cuadrados de color amarillo) utilizadas en el modelo numérico para representar el sistema de drenaje del DLLB mediante el paquete DRN de MODFLOW-USG. En la presente actualización no se modificó el trazado de las celdas DRN respecto del modelo base, sólo se hicieron las modificaciones necesarias para reflejar que el modelo ahora tiene 100 capas en vez de 37 (como el modelo base). De esta forma los drenes pasaron de estar asignados en la capa 33 a la capa 96 (1ra capa hidrogeológica).

Figura 4-17. Drenes basales incluidos en el modelo numérico



*: Los polígonos en azul muestran los drenes que no son incluidos por el modelo debido a que no se encuentran construidos

** : Los polígonos verdes que no cuentan con celdas amarillas bajo estos representan drenes que, si bien fueron construidos, por la escala del modelo estos no fueron considerados debido a que se encuentran en zonas de aluvial con espesores menores a 20 m.

Fuente: Ref. 3

La configuración del paquete DRN de MODFLOW-USG (Harbaugh, 2005) requiere especificar dos parámetros:

- Altura umbral: Definida como 1 m bajo la topografía de la celda, excepto para el dren principal (DP) para el cual se consideraron 2 m bajo terreno.
- Conductancia (m^2/d): Los valores fueron modificados respecto del modelo original producto de la recalibración del presente modelo, obteniéndose:
 - DP1 : 206,1 m^2/d

- DL2 : 408,7 m²/d
- DL3 : 524,2 m²/d
- DL6-1 : 383,8 m²/d

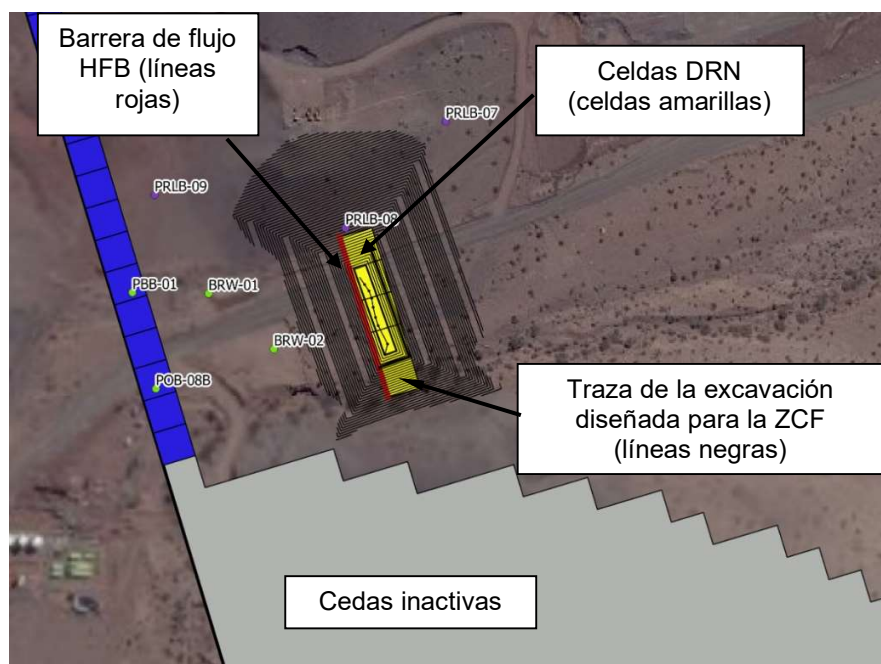
4.7.4 Zanja cortafugas (ZCF)

La representación de la zanja cortafuga (ZCF) no fue modificada respecto del modelo original (Figura 4-18). Todas las propiedades definidas previamente se mantienen, esto es:

- El uso del paquete HFB para representar la cara impermeable ubicada aguas abajo de la ZCF, y
- El uso del paquete DRN para representa la extracción de aguas que ocurre en ella.

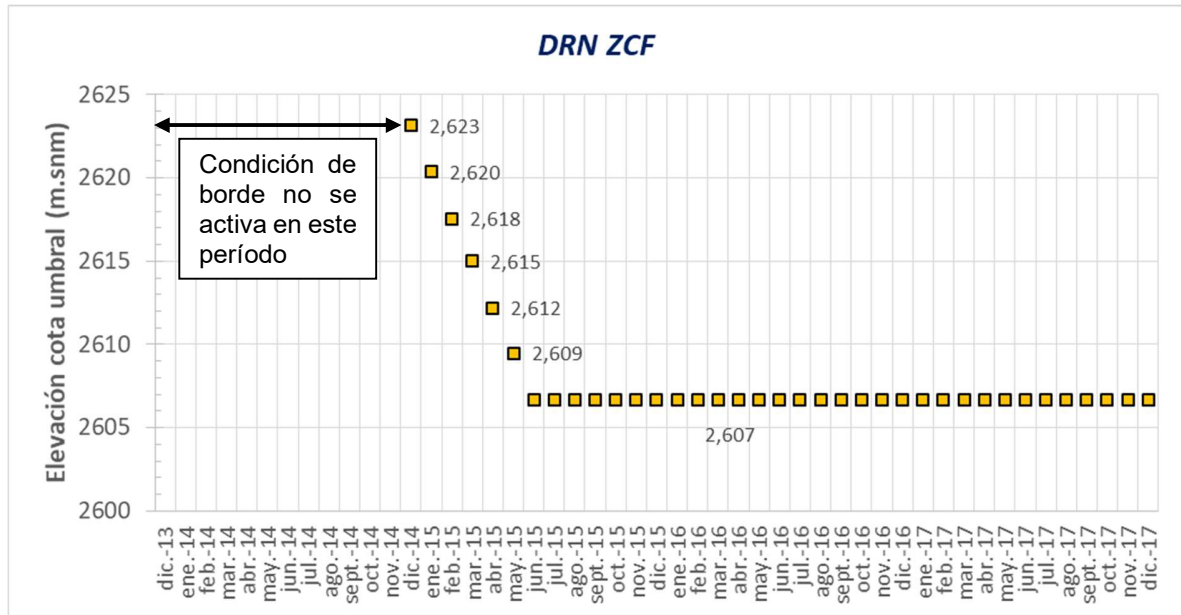
Para las celdas tipo DRN empleadas en la ZCF (celdas amarillas en Figura 4-18) el valor de conductancia inicial fue de 50 m²/d (igual que el modelo original) el cual se calibró en 374,1 m²/d, mientras que la altura umbral fue definida considerando el nivel dinámico registrado en el pozo PPO-32, el cual desde julio 2015 se encuentra estable a una profundidad aproximada de 23 m.bnt, valor que se mantuvo con leves variaciones, razón por la cual se mantuvo con un valor constante en el modelo actualizado (Figura 4-19).

Figura 4-18. Condiciones de borde aplicadas en zanja cortafuga



Fuente: Ref. 3

Figura 4-19. Altura umbral definida para DRN en ZCF



Fuente: elaboración propia con datos de MLCC

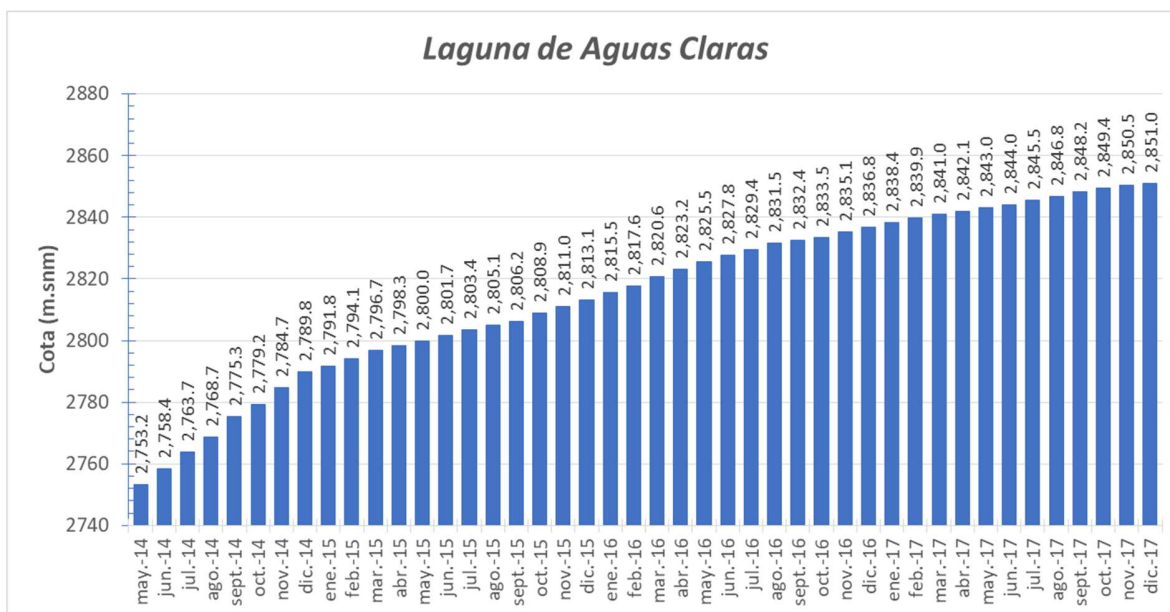
4.7.5 Laguna de aguas claras

En la Figura 4-20 se presenta la variación temporal de la cota de la laguna de aguas claras asignada al modelo. Estos datos provienen de la estadística de mediciones que dispone MLCC desde agosto 2014 hasta diciembre 2017 y corresponden al valor del último día del mes. Previo a agosto 2014 se consideró proyectar hacia atrás las cotas en base a una interpolación lineal de las mediciones del año 2014.

Al igual que en el modelo original la altura de agua asociada a la laguna de aguas claras fue ingresada al modelo mediante las opciones que entrega el paquete TIB, el cual permite al activar una capa asignarle una condición de borde tipo CHD a celdas seleccionadas, este caso aquellas asociadas a las lamas. De esta forma cuando una capa es activada en el tiempo "t" la elevación de la laguna es aplicada como una condición de borde de altura conocida a esa capa particular. Luego, al pasar al mes siguiente (tiempo t+1), y activarse así la capa superior, la condición de borde asignada en el tiempo "t" a la capa inferior es removida, dejando la celda libre para modificar su nivel en base al balance de aguas de la celda, pasando entonces a aplicar la condición de borde de carga conocida sobre la capa superior (tiempo t+1). Este proceso se repite sucesivamente hasta el final de la simulación.

Finalmente, cabe mencionar que se aplica la misma carga hidráulica tanto al relave sumergido como a las playas.

Figura 4-20. Variación del nivel de agua de la laguna de aguas claras considerada para el modelo actualizado



Fuente: elaboración propia con datos operacionales de MLCC

5 SIMULACIÓN DE CONDICIONES HISTÓRICAS (RECALIBRACIÓN DEL MODELO)

5.1 Generalidades

Una vez actualizado el modelo con la información de bombeos desde el acuífero, crecimiento del depósito y la mejora del proceso de consolidación de las lamas (K vs tiempo) se procedió a simular la operación histórica del depósito buscando replicar el comportamiento del aforador y pozos aguas bajo del muro, modificando los parámetros hidráulicos de los materiales, proceso que se conoce como calibración del modelo. En esta sección se describe el proceso realizado y los principales resultados de éste.

5.2 Estrategia de calibración

Al igual que en el modelo original, el proceso de calibración se inició modificando manualmente (prueba y error) las permeabilidades (K) y los coeficientes de almacenamiento (S) de las unidades hidrogeológicas consideradas más relevantes. En este caso: unidad de aluviales (quebrada principal y quebrada La Brea), rocas meteorizadas aguas arriba del muro (estribo derecho y zona centro-sur). El objetivo principal de este proceso fue minimizar la discrepancia entre el comportamiento simulado para los drenes del muro y el valor promedio mensual de los datos medidos en el aforador, en particular, se buscaba representar el ascenso abrupto del caudal que ocurre desde agosto a noviembre 2015.

Luego de sucesivas iteraciones manuales se procedió a modificar el método de calibración pasando a ejecutar una calibración asistida mediante el software PEST (Ref. 10). Para esto se empleó la técnica de “puntos pilotos” con regularización (Ref. 7, Ref. 8, Ref. 9), el cual representa el método de calibración (optimización no-lineal) más flexible, robusto y avanzado disponible en la actualidad para modelos de aguas subterráneas.

El método de puntos pilotos permite introducir heterogeneidad dentro de una unidad hidrogeológica, respecto de un valor basal, sólo en la medida que es necesaria para explicar el comportamiento de los datos observados, en principio: aforador y niveles en pozos aguas abajo del muro. La intención de emplear este método fue el de entregar la mayor flexibilidad en la estimación de la distribución espacial de las permeabilidades del aluvial, debido a que el comportamiento del aforador sugería que el ascenso abrupto de caudales podría deberse, en parte, a un área específica de mayor permeabilidad dentro de esta unidad, la cual no pudo ser identificada con el proceso manual. Al mismo tiempo que se calibraron las permeabilidades del aluvial, se incluyó la calibración de otras unidades de roca (menos permeables) para las cuales no se cuenta con control directo de niveles, pero que sí tienen influencia sobre el comportamiento hidrogeológico general del modelo. Dichas unidades fueron calibradas usando el enfoque de zonas, es decir, mantienen un valor homogéneo de permeabilidad en toda su extensión.

En la medida que el proceso de optimización fue avanzando se vio la necesidad de incorporar otras variables de calibración para mejorar la respuesta del modelo (eg. conductancia de drenes del muro y ZCF, permeabilidad inicial de las lamas). Justamente, una mejora sustantiva se logró al incluir el ajuste la permeabilidad inicial de las lamas. A diferencia del modelo precedente (ver Ref. 3) las permeabilidades iniciales de las lamas fueron calibradas usando también el método de puntos pilotos, en vez del enfoque por zonas usado previamente. De esta forma se le entregó flexibilidad adicional al proceso de calibración que se requiere para sacar el máximo provecho al mejoramiento del proceso de consolidación que fue introducido al modelo. Incluir este parámetro dentro del proceso de optimización fue lo que finalmente permitió, en conjunto a los otros parámetros lograr una mejor representación del comportamiento del aforador, respecto del modelo de la Ref. 2.

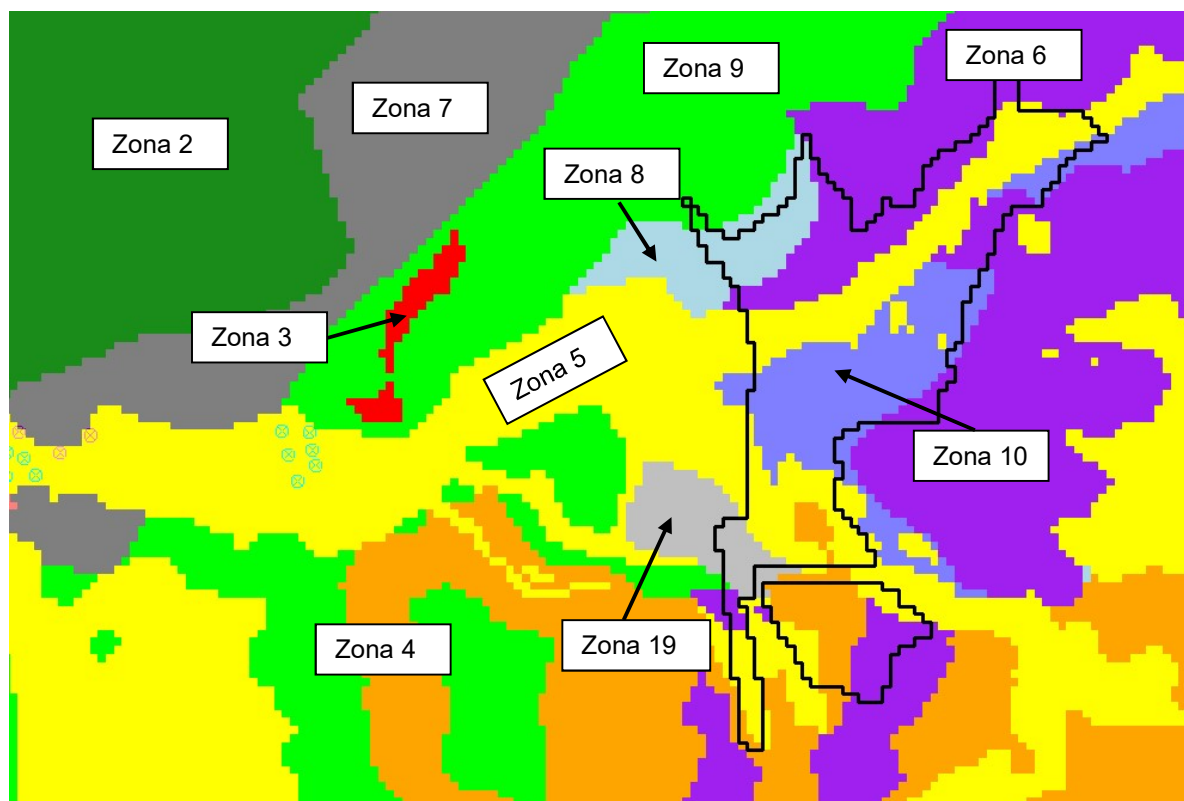
A continuación, a modo de resumen, en la Tabla 5-1 se indican los rangos considerados para ajustar los parámetros calibrados. Este resumen se apoya además en la Figura 5-1, la cual muestra la distribución inicial de zonas de permeabilidad/coeficientes de almacenamiento, que fue utilizada como base para la configuración de la calibración.

Tabla 5-1: Resumen de parámetros calibrados

Zona / Reach	Descripción	Método	Parámetro	Rango de valores		
				Ini	Min	Max
2	Areniscas/conglomerado superior	Por Zona	Kx (m/d)	0.1	1.00E-04	1
			Kx/Kz (-)	1	5	20
			Sy (-)	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-02
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
3	Dique	Por Zona	Kx (m/d)	0.55	5.50E-02	5.5
			Kx/Kz (-)	1	0.1	10
			Sy (-)	1.00E-03	7.50E-04	0.05
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
4	Basamento	Por Zona	Kx (m/d)	3.00E-04	1.00E-04	1.00E-02
			Kx/Kz (-)	1	0.1	10
			Sy (-)	1.00E-03	1.00E-04	0.01
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
5	Depósitos aluviales	Puntos Pilotos	Kx (m/d)	25	0.01	70
		Por zona	Kx/Kz (-)	10	1	20
			Sy (-)	0,1	0,01	0,2
			Ss (1/m)	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-04
6	Andesitas competentes (lavas triásicas)	Por zona	Kx (m/d)	5,00E-03	9,00E-04	9,00E-03
			Kx/Kz (-)	10	1	20
			Sy (-)	0,01	0,001	0,05
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
7	Andesita Jurásicas (lavas lagunillas)	Por zona	Kx (m/d)	1,00E-02	1,00E-03	9,00E-02
			Kx/Kz (-)	10	1	20
			Sy (-)	0,01	0,001	0,05
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07

Zona / Reach	Descripción	Método	Parámetro	Rango de valores		
				Ini	Min	Max
8	Roca meteorizada estribo derecho	Por zona	Kx (m/d)	1	0,01	5
			Kx/Kz (-)	1	0,1	10
			Sy (-)	0,01	0,001	0,05
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
9	Areniscas/conglomerado	Por zona	Kx (m/d)	1,00E-02	1,00E-03	9,00E-02
			Kx/Kz (-)	10	1	20
			Sy (-)	0,01	0,001	0,05
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
10	Roca meteorizada centro-sur	Por zona	Kx (m/d)	0.25	1.00E-02	1.00E+01
			Kx/Kz (-)	1	0,1	10
			Sy (-)	1.00E-03	7.50E-04	5.00E-02
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
19	Cerro sin nombre	Por zona	Kx (m/d)	2,5	0,1	15
			Kx/Kz (-)	10	1	20
			Sy (-)	0,1	0,01	0,2
			Ss (1/m)	1.00E-05	1.00E-07	1.00E-05
14	Roca bajo depósito (principalmente andesita)	Por zona	Kx (m/d)	7,50E-02	1,00E-03	1.00E-01
			Kx/Kz (-)	1	0.1	10
			Ss (1/m)	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-07
52 a 94	K Inicial Relave (todas las capas)	Puntos Pilotos	Kx = Kz (m/d)	1	1.00E-03	40
22	Dren en ZCF	Por zona	Conductancia (m2/d)	400	40	700
23	Dren DL2 (muro)	Por zona	Conductancia (m2/d)			
24	Dren DL3 (muro)	Por zona	Conductancia (m2/d)			
25	Dren DL6-1 (muro)	Por zona	Conductancia (m2/d)			
26	Dren DP1 (muro)	Por zona	Conductancia (m2/d)			

Fuente: elaboración propia

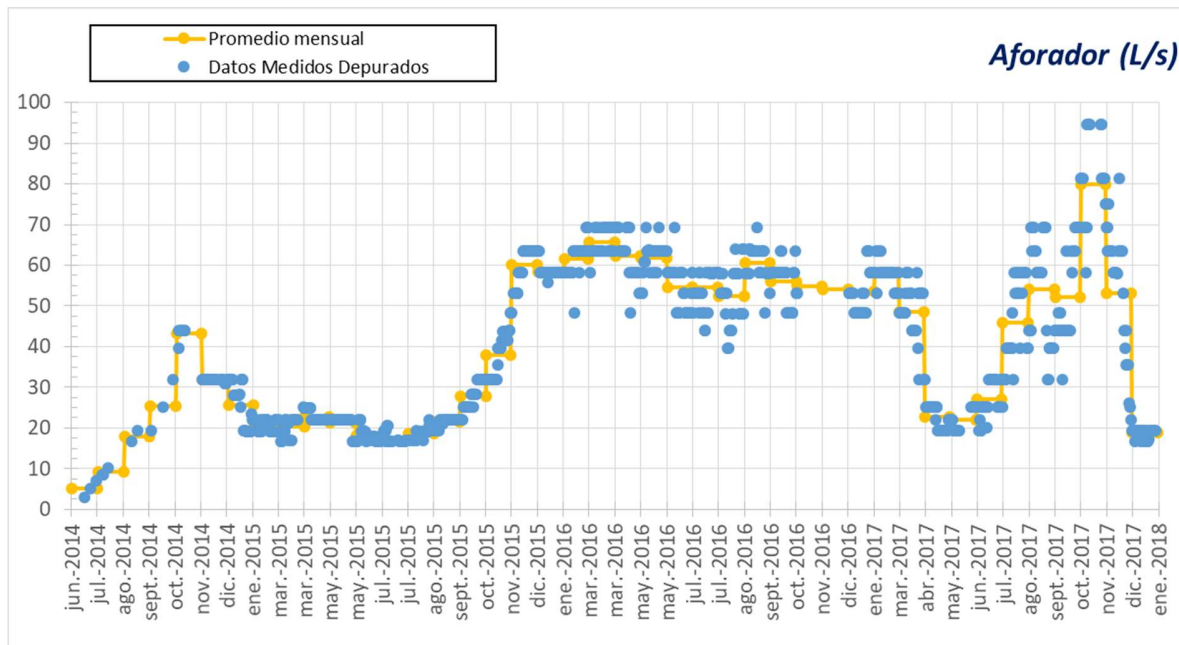
Figura 5-1: Zonificación inicial de K y S de zonas recalibradas

Fuente: modificada de Ref. 3

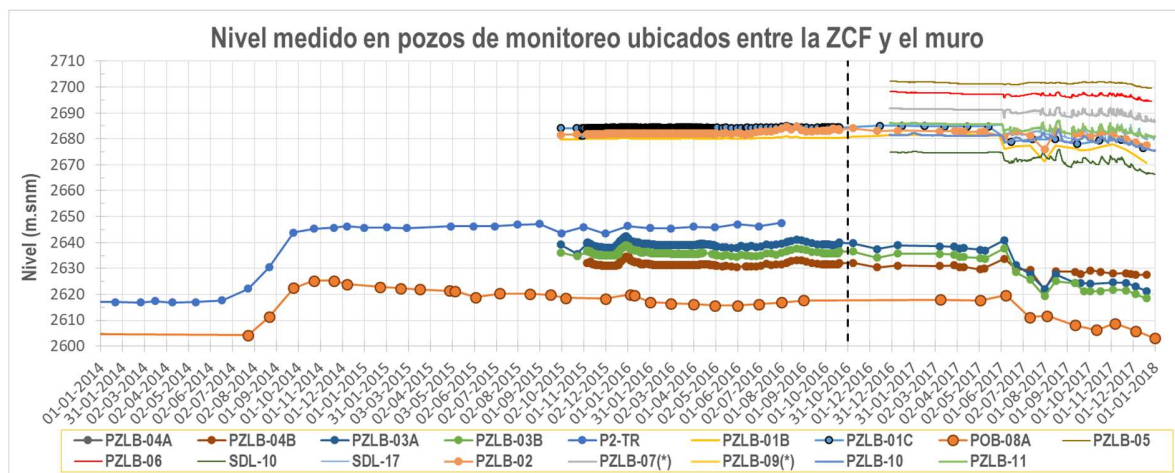
Patrón de calibración

Para desarrollar la optimización de los parámetros indicados en la Tabla 5-1 se incluyó la siguiente información dentro del patrón de calibración:

- **Caudal del aforador (Figura 5-2).** Se trabaja con los valores promedio mensuales de la estadística depurada. La depuración eliminó sólo valores extremos aislados.
- **Nivel de agua en pozos de monitoreo (Figura 5-3 y Figura 5-4).** Se incluyen pozos de monitoreo ubicados entre la ZCF y el muro. En esta oportunidad se aumentó desde 9 pozos considerados por el modelo original a 17 pozos, gracias a la incorporación de los piezómetros PZLB 05 a 11 (8 puntos adicionales). La información nueva incorporada al modelo abarca el período de octubre 2016 a diciembre 2017 (14 meses).
- **Extracciones de agua en pozos de bombeo (Figura 4-16).** Una de las opciones que entrega MODFLOW-USG es limitar la cantidad de agua que extraen los pozos, en base al espesor saturado de la celda, lo cual tiene relación con el potencial hidrogeológico de la unidad desde donde bombean. Considerando esto, se decidió agregar las extracciones medidas como una variable adicional para restringir el campo de permeabilidades/almacenamiento que obtiene PEST. De esta forma se busca que los parámetros hidráulicos del acuífero, además de explicar los niveles de agua, sea capaz de sostener las extracciones reales sin generar descensos que “secan” el pozo.

Figura 5-2: Caudal promedio mensual del aforador

Fuente: elaboración propia con datos operacionales de MLCC

Figura 5-3: Niveles observados en pozos considerados para la calibración del modelo

Fuente: elaboración propia con datos monitoreados por MLCC

Figura 5-4: Ubicación de pozos de monitoreo considerados para la recalibración del modelo

Fuente: elaboración propia con coordenadas de pozos provistas por MLCC

5.3 Resultados

La recalibración del modelo es reportada en términos de:

- Propiedades hidráulicas calibradas para las unidades hidrogeológicas.
- Permeabilidades iniciales calibradas para las lamaz.
- Caudal total de drenes del muro, comparando valores medidos vs simulados.
- Comparación entre niveles simulados y observados (gráfico de dispersión), junto con los estadígrafos de residuales.
- Estimación de infiltraciones desagregada por unidad hidrogeológica.
- Flujo subterráneo pasante, aguas abajo de los drenes, por la unidad de depósitos aluviales.
- Verificaciones: extracciones de agua subterránea lograda por el modelo.

5.3.1 Propiedades hidráulicas

5.3.1.1 Acuífero

En la Tabla 5-2 se presenta una comparación entre los valores de permeabilidad (K) y el rendimiento específico (Sy) calibrados para cada unidad. Aquellos valores reportados como un valor medio solamente, corresponden a los calibrados por zonas, mientras que aquellos que tienen un valor medio, desviación estándar, el valor mínimo y máximo, representan las zonas calibradas con puntos pilotos.

Tabla 5-2: Resumen de resultados de parámetros hidráulicos calibrados para unidades hidrogeológicas

Zona	Descripción	Parámetro	Modelo original	Rango de valores			
				Valor medio	DesvEs _t	Min	Max
2	Areniscas / conglomerado superior	Kx (m/d)	0.1*	9.4.E-02	**	**	**
		Kx/Kz (-)	10	10.6	**	**	**
		Sy (-)	1%	0.82%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	1.02E-08	**	**	**
3	Dique	Kx (m/d)	0.55	0.51	**	**	**
		Kx/Kz (-)	1	0.9	**	**	**
		Sy (-)	1%	0.08%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	9.33E-09	**	**	**
4	Basamento	Kx (m/d)	3E-3*	2.9.E-03	**	**	**
		Kx/Kz (-)	1	0.8	**	**	**
		Sy (-)	0.1%	0.1%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	8.91E-09	**	**	**
5	Depósitos aluviales	Kx (m/d)	33,6**	38.0	8.5	4.3	57.6
		Kx/Kz (-)	8,7	8.3	**	**	**
		Sy (-)	20%	20%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-5*	1.04E-05	**	**	**
6	Andesitas competentes	Kx (m/d)	4,2E-03	4.0.E-03	**	**	**
		Kx/Kz (-)	7,0	6.7	**	**	**
		Sy (-)	0.96%	0.97%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	1.02E-08	**	**	**
7	Andesita superior	Kx (m/d)	1,8E-03	1.6.E-03	**	**	**
		Kx/Kz (-)	20	19.5	**	**	**
		Sy (-)	1.1%	1.0%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	9.60E-09	**	**	**
8	Roca meteorizada estribo derecho	Kx (m/d)	1,8	1.53	**	**	**
		Kx/Kz (-)	0,6	0.5	**	**	**
		Sy (-)	0.83%	0.80%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	8.13E-09	**	**	**
9	Areniscas/conglomerado	Kx (m/d)	2,4E-02	3.2.E-02	**	**	**
		Kx/Kz (-)	18,9	18.8235294	**	**	**
		Sy (-)	0.75%	0.71%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-8*	9.40E-09	**	**	**
10	Roca meteorizada centro-sur	Kx (m/d)	1,6E-01**	0.15	**	**	**
		Kx/Kz (-)	0,6	0.6	**	**	**
		Sy (-)	0.92%	0.89%	**	**	**

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Zona	Descripción	Parámetro	Modelo original	Rango de valores			
				Valor medio	DesvEs t	Min	Max
		Ss (1/m)	1E-8*	1.11E-08	**	**	**
19	Cerro sin nombre	Kx (m/d)	2,0	1.4	**	**	**
		Kx/Kz (-)	8,0	6.7	**	**	**
		Sy (-)	16%	15%	**	**	**
		Ss (1/m)	1E-3*	8.92E-07	**	**	**
14	Roca bajo depósito (principalmente andesita) (capa 98)	Kx (m/d)	7,5E-02	1.1.E-02	**	**	**
		Kx/Kz (-)	10	1.4	**	**	***
		Ss (1/m)	1E-8*	9.78E-09	**	**	**

*: Valor no calibrado en el modelo original

**.: Estos parámetros fueron calibrados por zona, el valor obtenido es único para dicha zona

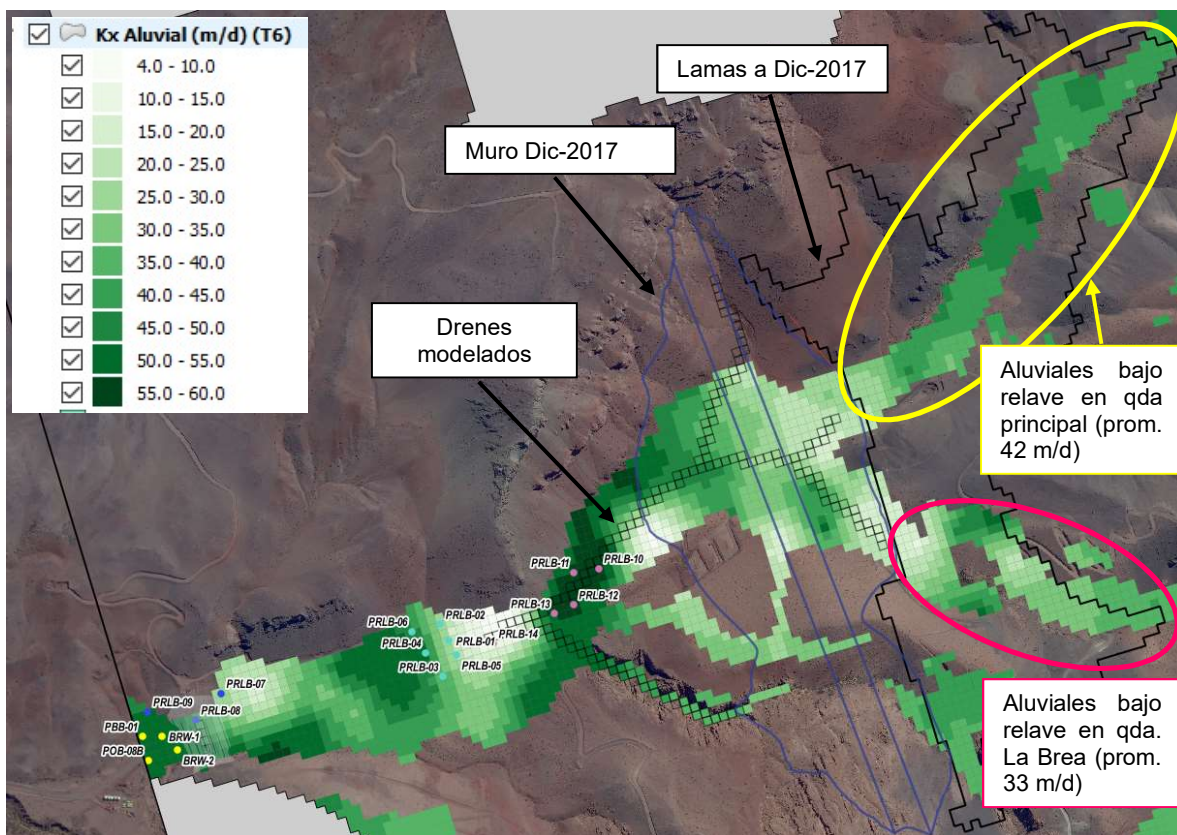
***.: El modelo anterior tenía un promedio de 33,6 m/d con un mínimo de 8 m/d y un máximo de 92 m/d.

***.: En el modelo original la roca meteorizada centro-sur estaba calibrada con puntos pilotos, esta vez se calibro por zona
Fuente: elaboración propia

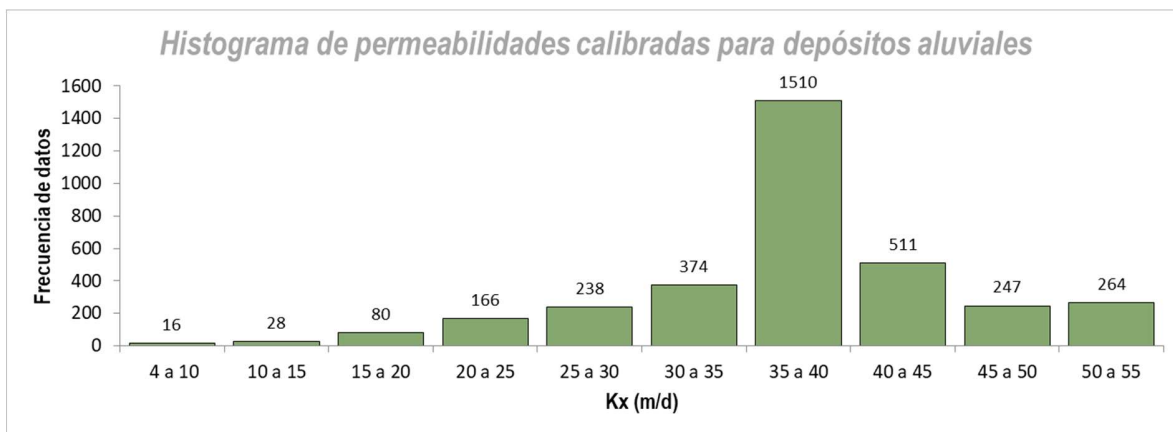
La Figura 5-5 presenta el campo de permeabilidades calibrado correspondiente a la variación espacial del parámetro Kx calibrado para la zona 5 (aluviales) mediante puntos pilotos, junto con el contorno que representa las lamas a diciembre 2017, la ubicación de las celdas dren del modelo. Además, la Figura 5-6 muestra un histograma de las conductividades hidráulicas obtenidas.

En términos generales, el histograma de permeabilidades muestra una distribución normal, levemente asimétrica centrada en el rango 35 a 40 m/d (recordar que el promedio es 38 m/d), donde el 43% de los valores estimados se encuentra en ese rango y el 82% en el rango de 25 a 50 m/d. Los valores máximos de permeabilidad (55 a 60 m/d) ocurren en la zona donde se ubican los nuevos pozos de bombeo (PRLB 10 a 14).

Al revisar las permeabilidades estimadas para el aluvial que se encuentra directamente bajo las lamas en la quebrada principal, se tiene un valor promedio de 42 m/d, con un valor mínimo de 25 m/d un máximo de 54 m/d, con más del 90% de los valores en el rango 30 a 50 m/d. Para el caso de los aluviales en quebrada La Brea bajo lamas, el promedio es de 33 m/d, con un mínimo de 15 m/d y un máximo de 55 m/d, con el 88% de los datos concentrados en el rango 20 a 50 m/d. Al igual que en el modelo anterior, se verifica que el promedio de los valores difiere entre la quebrada principal y quebrada La Brea, manteniéndose un valor superior en la quebrada principal.

Figura 5-5: Distribución de permeabilidades calibrada para unidad de aluviales (zona 5)

Fuente: elaboración propia

Figura 5-6: Histograma de permeabilidades calibrada para unidad de aluviales (zona 5)

Fuente: elaboración propia

5.3.1.2 Lamas

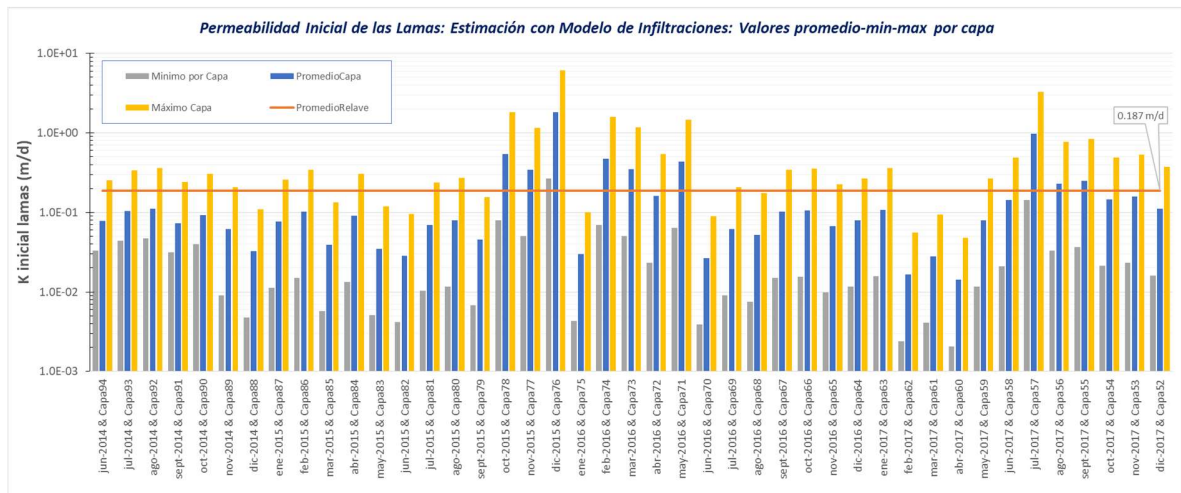
Las permeabilidades iniciales calibradas para las lamas son variables en el espacio tanto en planta como en profundidad. La Figura 5-7 muestra en un gráfico de barras la comparación entre permeabilidades inicial promedio, mínima y máxima por capa. La Figura 5-8 muestra una comparación entre el promedio y el aforador. La Figura 5-8 muestra un histograma para las permeabilidades de todo el modelo y la Figura 5-10 muestra una vista 3D de todo el depósito mostrando la variación espacial de las permeabilidades iniciales calibradas.

De la Figura 5-7 se tiene que el rango de permeabilidades iniciales estimadas para todo el depósito está entre los valores $2\text{E}-3$ y 6 m/d , con un valor promedio de $0,187\text{ m/d}$. Se observa en la Figura 5-8 que existe una cierta correlación entre los incrementos de permeabilidad modelados y la respuesta del dren, cuando el dren captura mayor agua el modelo recurre a capas de mayor permeabilidad en superficie. Al mismo tiempo cuando hay una disminución en el dren, el modelo responde reduciendo las permeabilidades iniciales de las lamas. Del histograma de permeabilidades se observa que el 85% de los valores se ubica en el rango $1\text{E}-2$ a $3\text{E}-1\text{ m/d}$, siendo los valores mínimos y máximos indicados previamente valores realmente de poca ocurrencia. Para mostrar los contrastes de permeabilidad en la Figura 5-10 se ha limitado el valor máximo a 2 m/d .

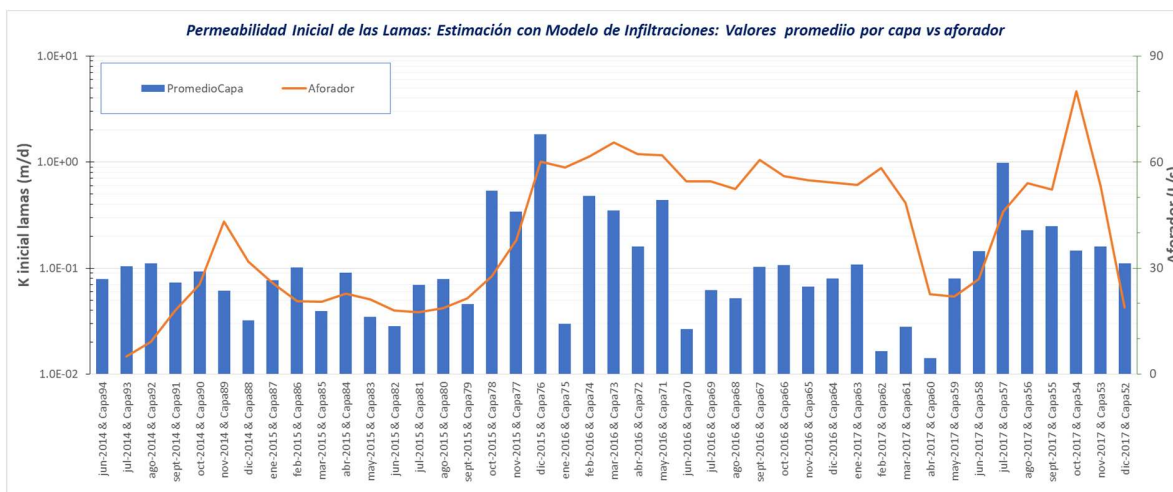
Cabe mencionar que, el valor de permeabilidad inicial promedio fue posteriormente utilizado como permeabilidad inicial de las lamas depositadas en la simulación de la operación proyectada (punto 6 de este documento).

Adicionalmente, se incluye en la Figura 5-11 el histograma de permeabilidades de las lamas a diciembre 2017, es decir, se muestra el efecto que genera la consolidación modelada sobre las permeabilidades de las lamas. En efecto se observa que el valor promedio (aritmético) se reduce de $0,186\text{ m/d}$ a $0,028\text{ m/d}$ (7 veces menor), con un valor mínimo de $3,8\text{E}-3\text{ m/d}$ y un máximo de $2,5\text{E}-1\text{ m/d}$. El valor mínimo es consistente con la curva K vs Z considerando el espesor aproximado de 100 m de los relaves. Además, el 84% de los valores se encuentra contenido en el rango $5\text{E}-3$ a $5\text{E}-2\text{ m/d}$.

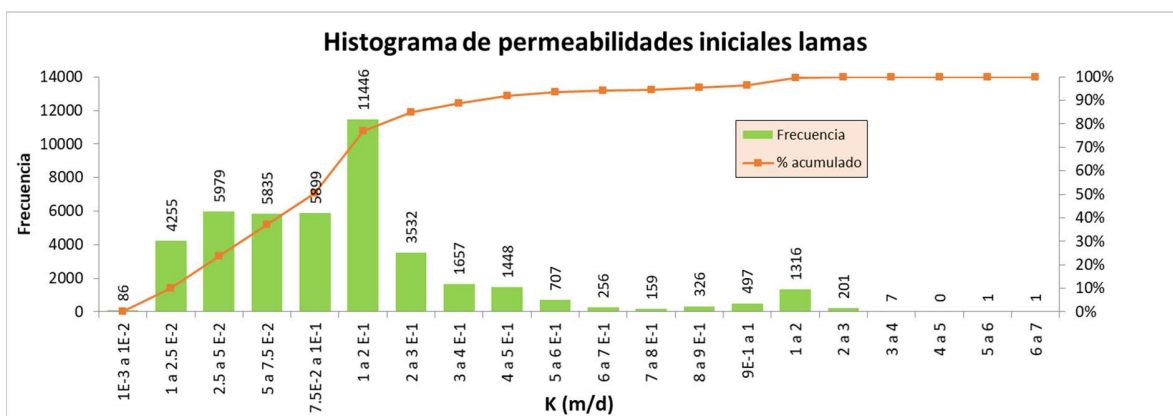
Figura 5-7: Permeabilidad inicial calibrada para lamas por etapa de crecimiento modelado



Fuente: elaboración propia

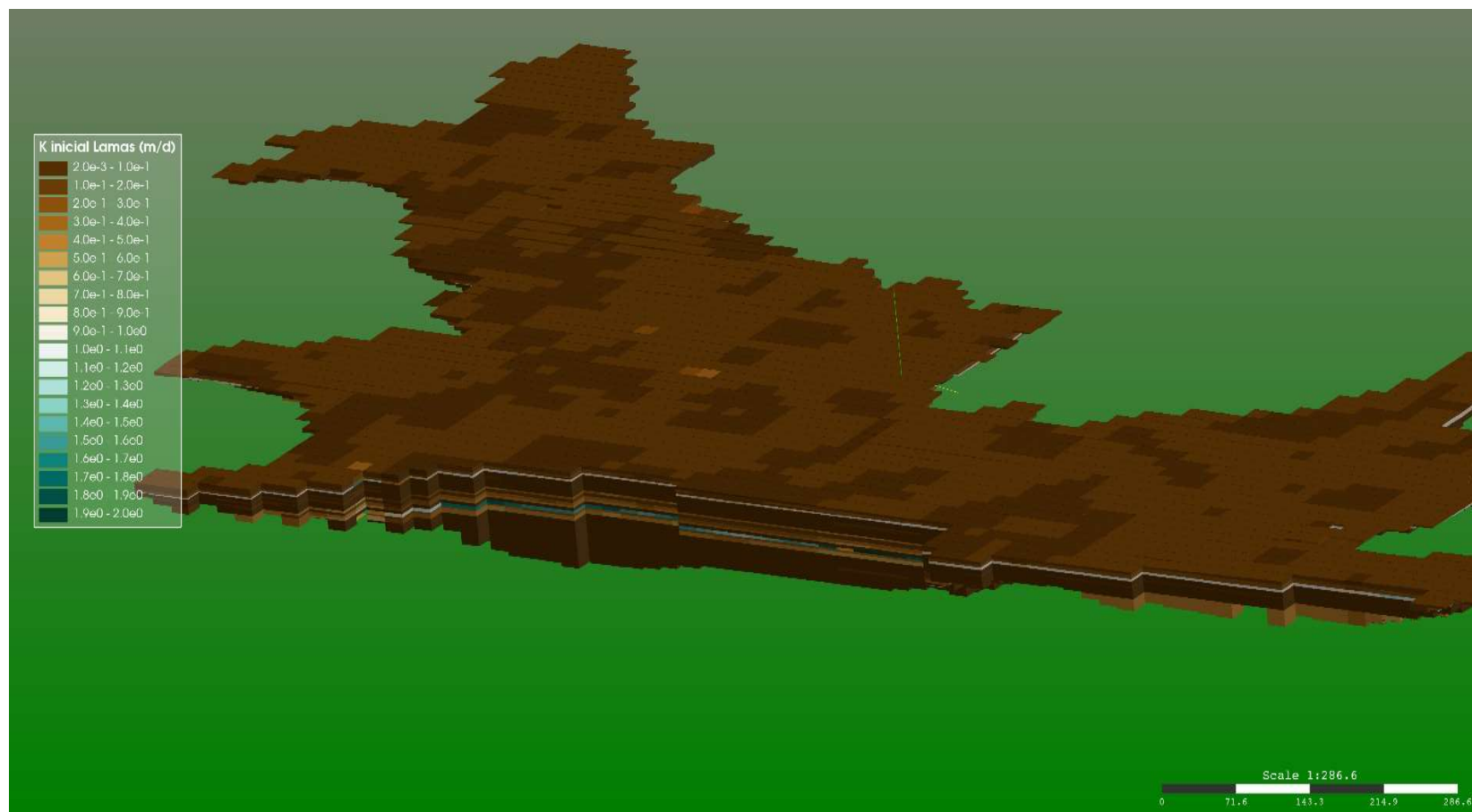
Figura 5-8: Permeabilidad inicial promedio calibrada vs aforador

Fuente: elaboración propia

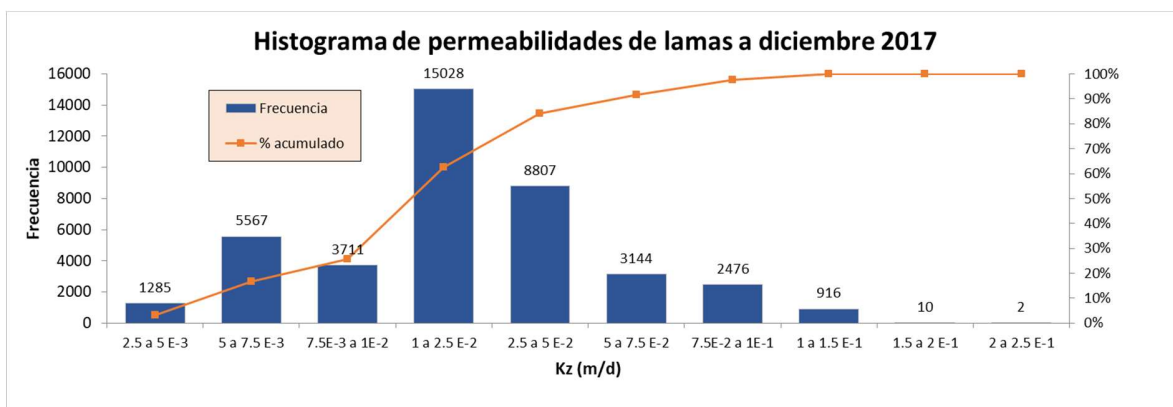
Figura 5-9: Histograma de permeabilidad inicial calibrada para lamas

Fuente: elaboración propia

Figura 5-10: Vista 3D de las permeabilidades iniciales calibradas para lamas del DLLB



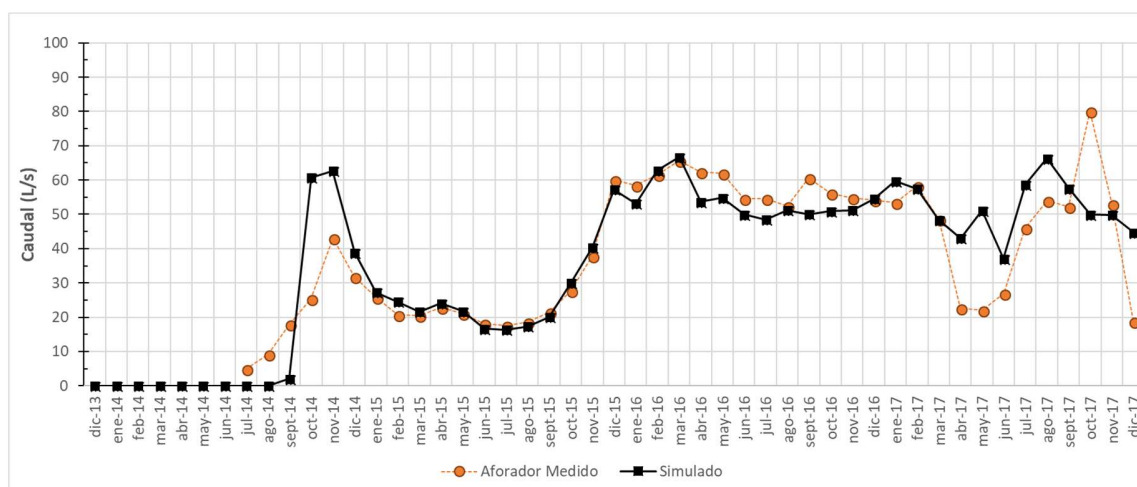
Fuente: elaboración propia

Figura 5-11: Histograma de permeabilidad de lamas a diciembre 2017

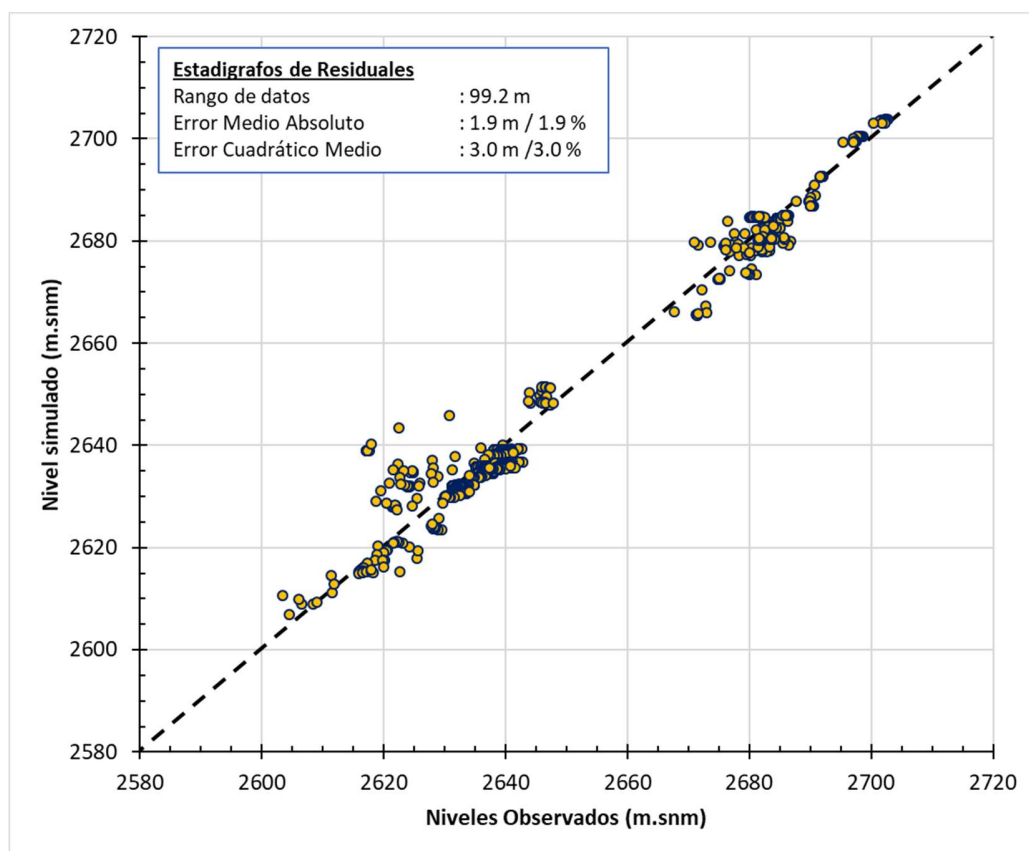
Fuente: elaboración propia

5.3.2 Comparación entre drenes y niveles de agua simulados vs observados

La Figura 5-12 y Figura 5-13 presentan el ajuste logrado para el caudal del aforador y los niveles de agua en pozos de monitoreo aguas abajo del muro, respectivamente. Con ellas se ejemplifica que el modelo es capaz de representar la situación histórica en relación al efectos que ha generado la infiltración sobre los sistemas de recuperación de agua (drenes) y la respuesta del acuífero frente a esto (niveles de agua en pozos / gradientes hidráulicos).

Figura 5-12. Comparación entre caudal simulado para sistema de drenaje y aforador

Fuente: elaboración propia

Figura 5-13. Comparación niveles simulados y observados

Fuente: elaboración propia

5.3.3 Estimación de infiltración durante operación histórica

El cálculo de la infiltración se hace considerando las zonas presentadas en la Figura 5-14 y se hace exclusivamente en la capa 96 del modelo numérico (capa 1 modelo hidrogeológico). De esta forma la infiltración se estima como el flujo que ingresa verticalmente desde la capa 95 (capa superior) hacia las celdas de la capa 96 (capa inferior) mediante la herramienta ZONBUDUSG.

La Figura 5-15 el caudal total de infiltración que se estima para el DLLB desde el inicio de su operación hasta diciembre 2017, alcanzado un valor medio de 159 L/s en ese período. Por otra parte, la Figura 5-16 desagrega por unidad hidrogeológica la infiltración, mostrando que las mayores ocurren por las unidades de suelo (aluvial principal, aluvial quebrada La Brea y por el cerro sin nombre) las que en promedio permiten el ingreso del 80% de las infiltraciones estimadas.

Figura 5-14: Zonas de balance empleadas para contabilizar las infiltraciones

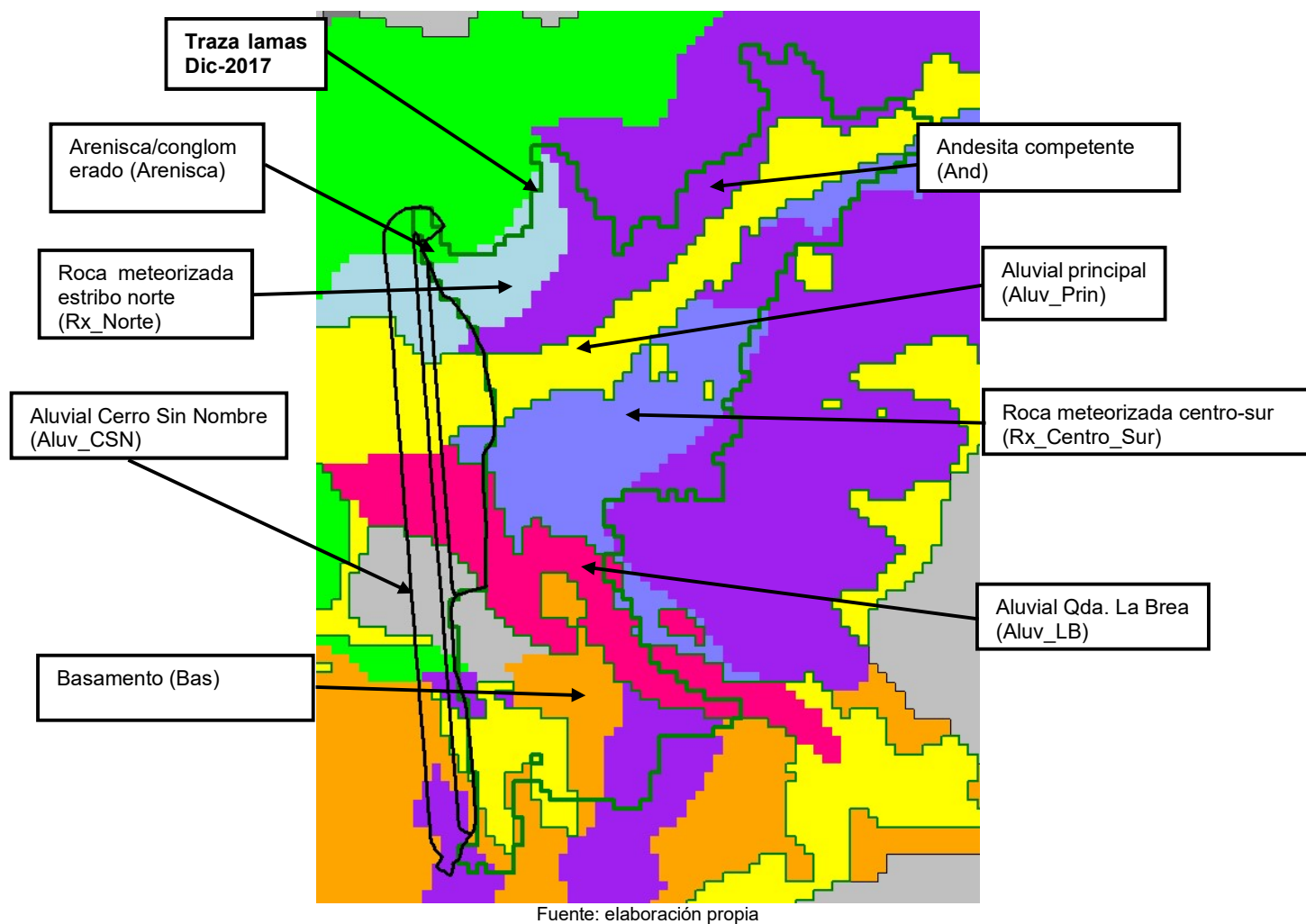


Figura 5-15. Estimación de infiltraciones DLLB mayo 2014 a diciembre 2017

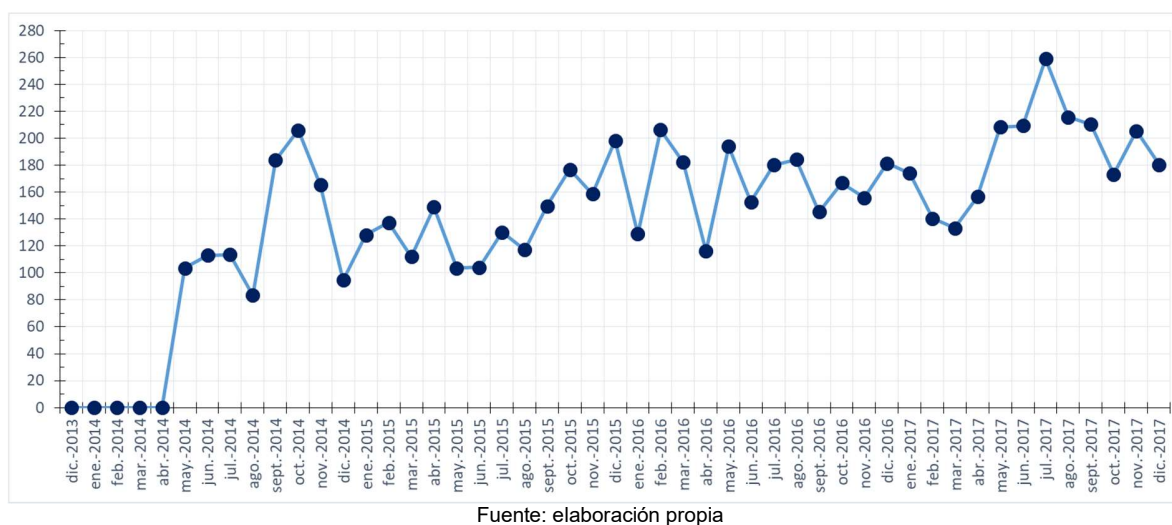
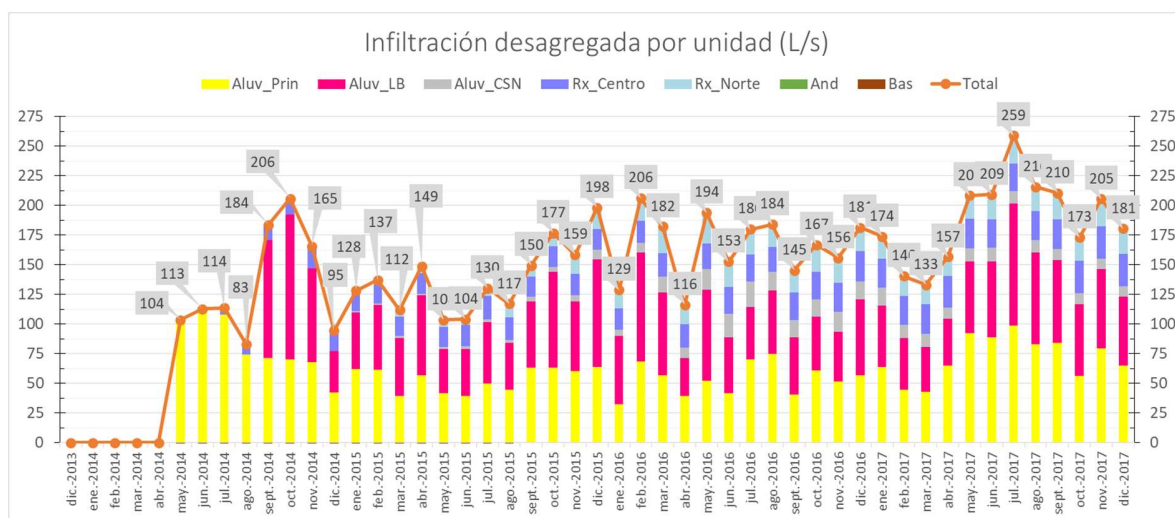
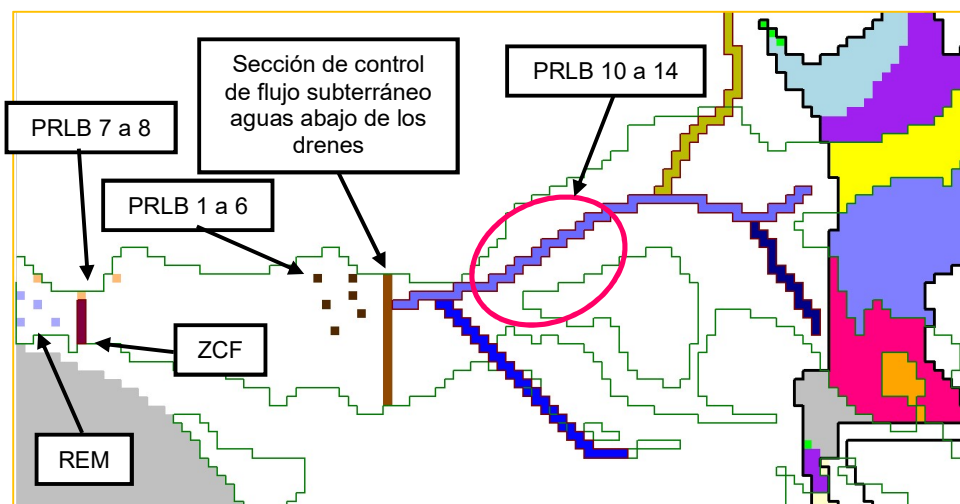


Figura 5-16. Estimación de infiltraciones DLLB desagregada por unidad hidrogeológica

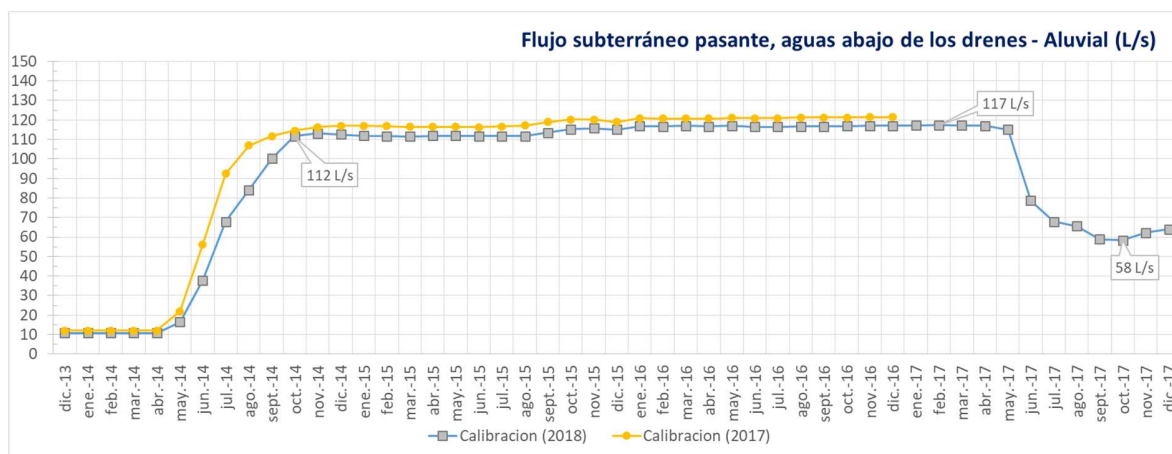
5.3.4 Flujo subterráneo pasante aguas abajo de los drenes

Otro resultado que puede obtener desde los resultados del modelo corresponde a la “infiltración neta”, es decir, aquella que ocurre al restar la infiltración estimada con lo que captan los drenes, dado que esto es lo que el sistema de remediación debe capturar.

Para analizar este factor, se presenta el resultado del flujo pasante estimado por el modelo en una sección de control inmediatamente aguas abajo de los drenes del muro, en la unidad de aluviales (Figura 5-17). La Figura 5-18 muestra este flujo, comparando la situación del modelo actualizado con el modelo anterior (Ref. 3). Se observa que ambas curvas tienen comportamientos y magnitudes similares. En ambos casos dicho flujo aumenta desde un valor base en torno a 10-12 L/s, pre-operación del DLLB, hasta valores que después de octubre 2014 se mantuvieron constantes en torno a 110-120 L/s hasta mayo 2014, ya que posterior a esto se inicia el bombeo de los pozos PRLB 10 a 14 que logra reducir prácticamente a la mitad el flujo pasante.

Figura 5-17: Sección de control utilizada para calcular flujo subterráneo pasante aguas abajo de los drenes

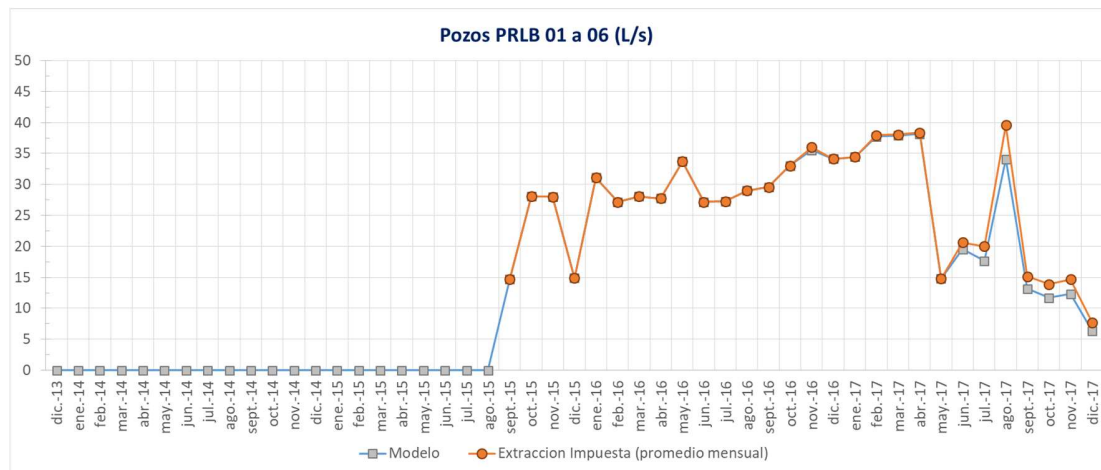
Fuente: modificada desde Ref. 3

Figura 5-18: Flujo subterráneo pasante por aluviales, comparación entre modelo original y modelo actualizado

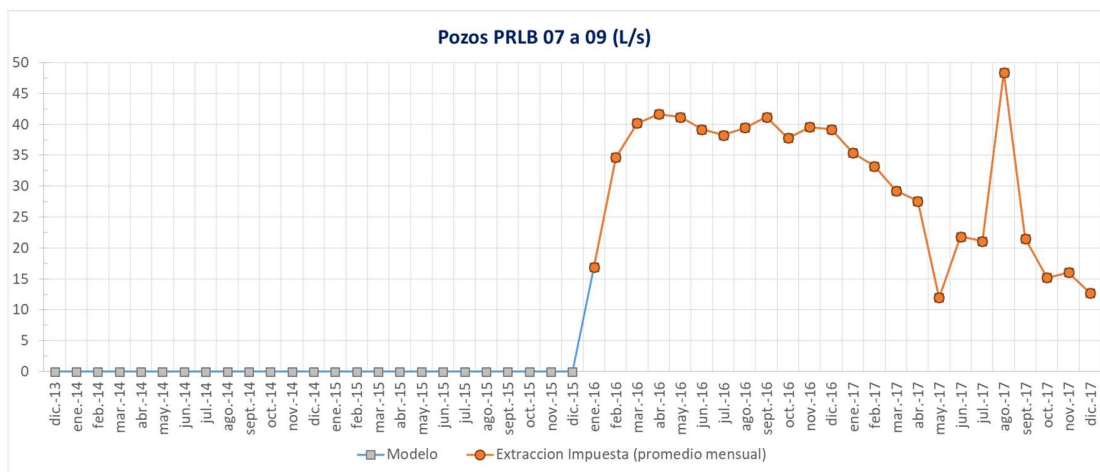
Fuente: elaboración propia

5.3.5 Verificaciones adicionales

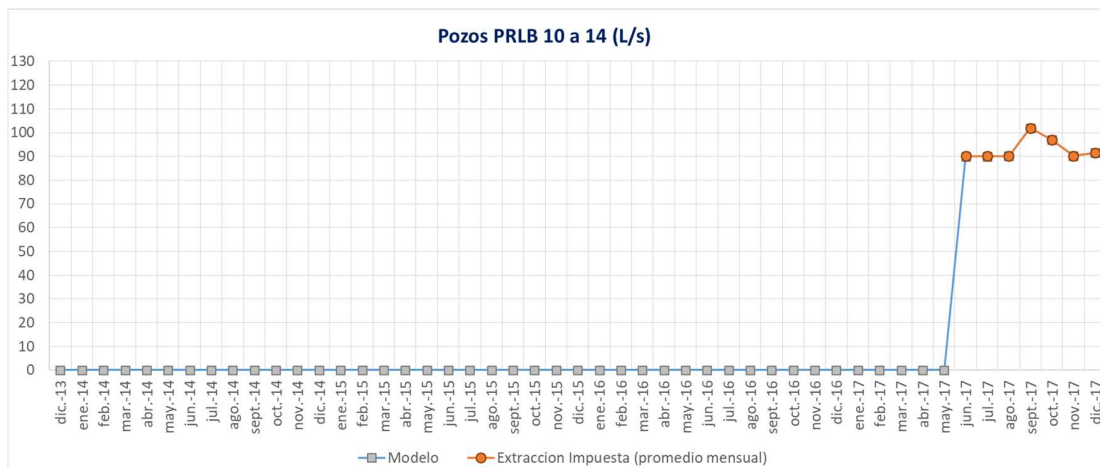
En la Figura 5-19 a Figura 5-22 se presenta una comparación entre las extracciones impuestas y las modeladas para los pozos PRLB y pozos de remediación incluidos en el modelo, respectivamente. Se observa que las extracciones de los pozos PRLB son reproducidas prácticamente en su totalidad, solo hay discrepancias en los PRLB 1 a 6, mientras que las de los pozos de remediación no. Esto último se debe a que 2 de estos pozos se encuentran directamente sobre la condición de borde de flujo subterráneo de salida, la cual impide alcanzar la extracción impuesta. De todas formas, este hecho no afecta sustantivamente el desempeño del modelo como herramienta de estimación de infiltraciones, producto de la distancia en la que se encuentran éstos pozos respecto del depósito de relaves.

Figura 5-19: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 1 a 6

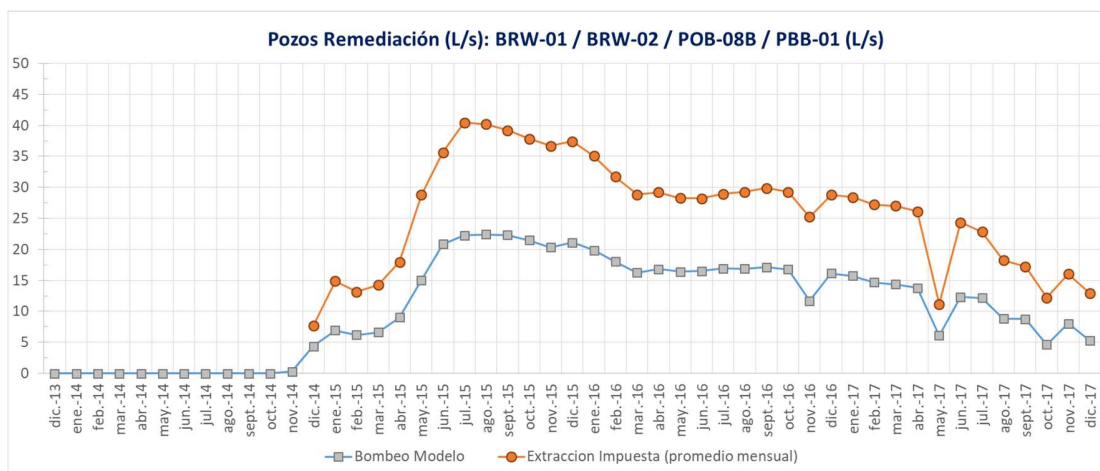
Fuente: elaboración propia

Figura 5-20: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 7 a 9

Fuente: elaboración propia

Figura 5-21: Verificación de extracciones impuestas a pozos PRLB 10 a 14

Fuente: elaboración propia

Figura 5-22: Verificación de extracciones impuestas a pozos de REM incluidos en el modelo

Fuente: elaboración propia

6 SIMULACIÓN DE OPERACIÓN PROYECTADA

6.1 Generalidades

Como parte del desarrollo de la “Ingeniería para EIA del depósito de Lamas La Brea”, Arcadis ha desarrollado la simulación de llenado del depósito para el período 2019 a 2037, la cual es reportada en Ref. 5.

A partir de este plan se ha modificado el modelo numérico incorporando la geometría proyectada para las lamas así como la cota proyectada para la laguna y se ha construido un modelo de simulación para estimar infiltraciones durante el período de operación proyectada.

A continuación se describen los principales supuestos y resultados de este modelo.

6.2 Consideraciones para simulación de infiltraciones

6.2.1 Crecimientos

El llenado del depósito en condiciones de operación proyectada ha sido simulado en el modelo de infiltraciones considerando 26 crecimientos, los cuales sumados los 44 del periodo histórico combinan un total de 70 crecimientos para el modelo de infiltraciones. De esta forma, el modelo utiliza las capas 26 a 51 para representar la operación futura y las capas 52 a 95 para representar la operación histórica, como fue descrita en el punto 4.5. La Tabla 6-1 resume las fechas asociadas a los crecimientos considerados en el modelo para la operación proyectada, junto con la capa del modelo a la cual son asignados y la cota de laguna.

Tabla 6-1: Resumen de crecimientos considerandos para operación proyectada

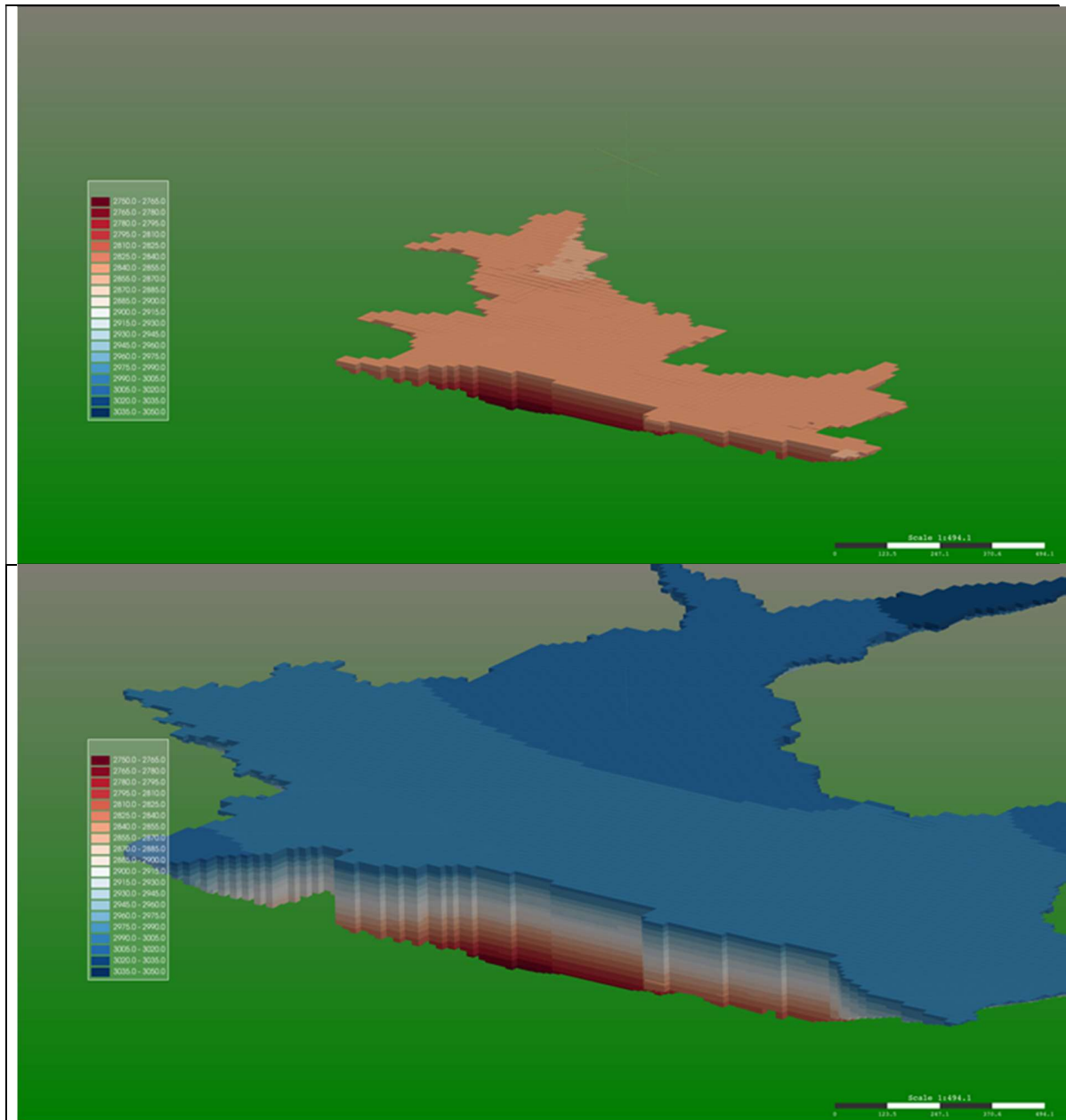
Capa Modelo	Mes	Cota Laguna	Capa Modelo	Mes	Cota Laguna
51	mar-18	2855,9	38	dic-22	2907.7
50	jun-18	2859,6	37	dic-23	2913.1
49	sept-18	2862,6	36	mar-25	2926.8
48	dic-18	2868,4	35	dic-25	2930.8
47	mar-19	2868,4	34	feb-27	2938.7
46	jun-19	2871,2	33	dic-27	2944.2
45	sept-19	2874,2	32	feb-29	2950.7
44	dic-19	2877,4	31	dic-29	2956.5
43	jun-20	2877,9	30	dic-30	2962.2
42	dic-20	2886,3	29	dic-31	2967.6
41	jun-21	2893,5	28	ago-33	2975.6
40	mar-22	2898,4	27	dic-35	2987.2
39	jun-22	2903,1	26	dic-37	2995.7

Fuente: elaboración propia con datos de Ref. 5

Cabe mencionar que si bien la ingeniería de Arcadis abarca el período 2019 en adelante, el año 2018 también fue proyectado e incorporado al modelo.

En total se simulan 109 períodos de stress los cuales incluyen a los 49 usados en el periodo histórico. La escala temporal se mantiene en mensual para el año 2018, se amplía a trimestral hasta el 2020 y luego se aumenta a semestral hasta el final de la simulación. Esta discretización sólo se cambia cuando ingresa una nueva etapa de crecimiento. La discretización temporal del modelo de simulación es presentada en el Anexo D.

Figura 6-1: Vista 3D del crecimiento histórico del depósito (arriba) y el crecimiento proyectado (abajo) para el DLLB

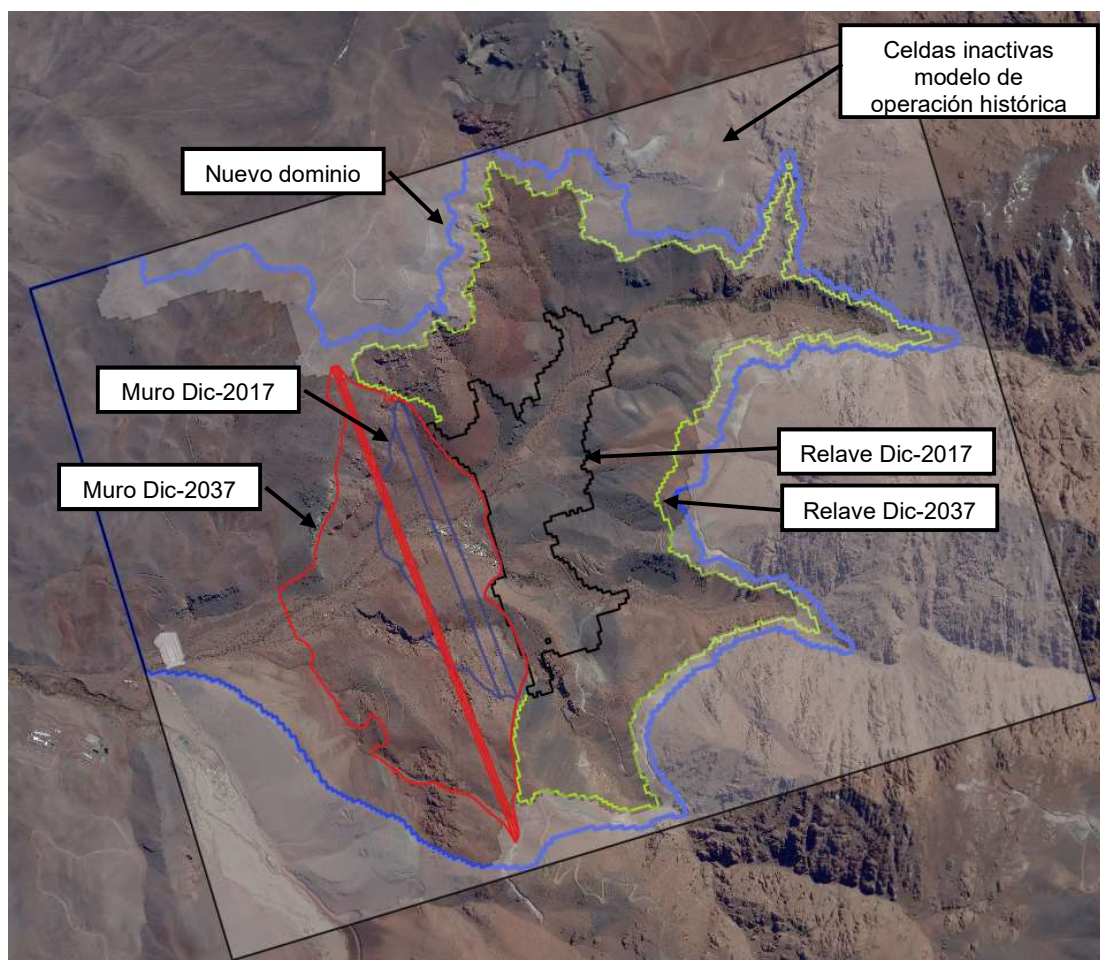


Fuente: elaboración propia en base a batimetrías históricas medidas por MLCC y proyectadas por Arcadis

6.2.2 Dominio de modelación

El dominio activo de modelación definido para la simulación de operación histórica (modelo de calibración) tuvo que ser ampliado producto de las dimensiones que Ref. 5 proyectó para el DLLB a diciembre 2037. La Figura 6-2 muestra el nuevo dominio activo considerado.

Figura 6-2: Modificación al dominio de modelación para simulación de operación proyectada



Fuente: elaboración propia

6.2.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del acuífero se mantuvieron de acuerdo a los valores calibrados y reportados en el capítulo anterior, mientras que para las nuevas capas de relave se asumió que estas ingresan con una permeabilidad inicial de 0,186 m/d, tal como fue indicado en el punto 5.3.1.2.

6.2.4 Recarga y descarga natural

Esta condición de borde ha sido modificada para ser incorporada en los límites activos del nuevo dominio de modelación, siguiendo el mismo concepto del modelo de operación histórica. Es decir, empleando la piezometría desarrollada por Ref. 2.

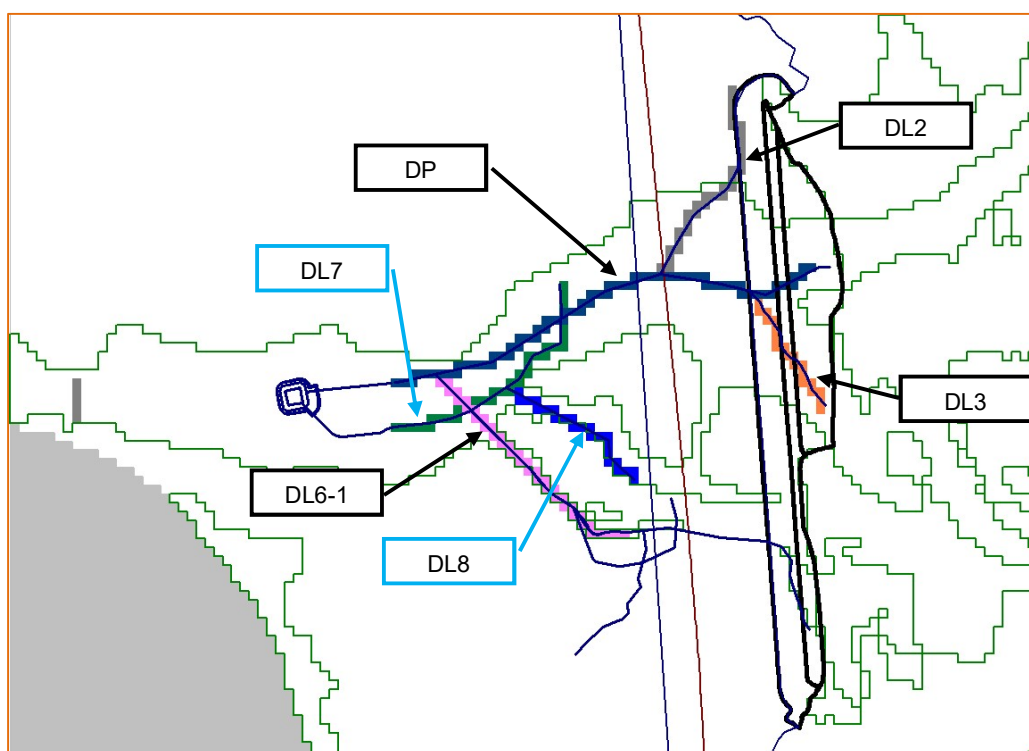
6.2.5 Extracciones de agua subterránea

Para efectos de esta simulación se ha considerado mantener constantes las extracciones de todos los pozos de extracción del último mes del modelo de operación histórica (diciembre 2037) hasta el final de la simulación. De esta forma se mantiene la operación conjunta del bombeo y del sistema de drenaje del muro.

6.2.6 Sistema de drenaje del muro

Para la simulación se incorporan 2 de los nuevos drenes que han sido diseñados por Arcadis (referencia) para reforzar el sistema de drenaje del muro principal. Estos corresponden al Dren Lateral 7 (DL7) y el Dren Lateral 8 (DL8). La Figura 6-3 muestra su ubicación relativa el resto de los drenes modelados.

Figura 6-3: Sistema de drenaje considerado en simulación de operación proyectada

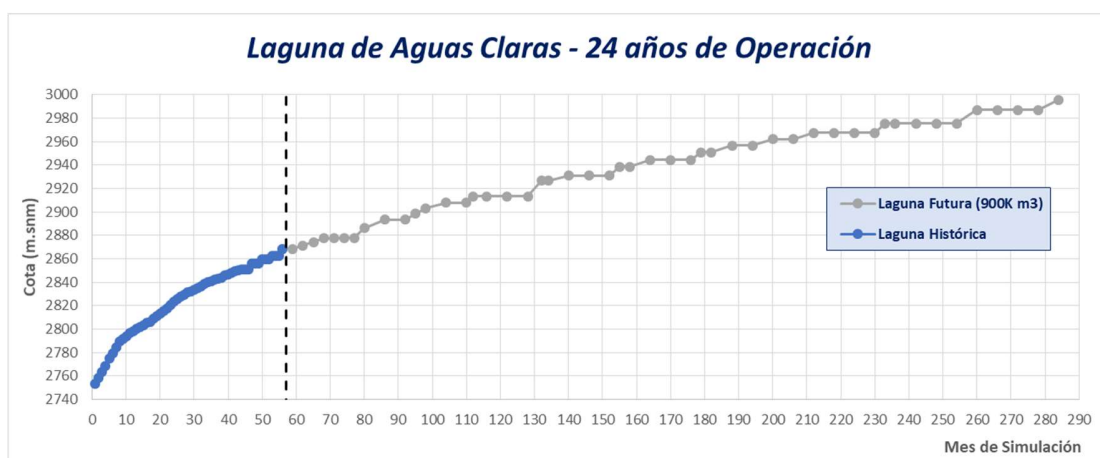


Fuente: elaboración propia – sistema de drenaje proyectado por Ref.X

6.2.7 Laguna de aguas claras

El plan de crecimiento modelado en Ref. 5 considera una laguna operacional de 900 K m³, la evolución temporal de la cota de dicha laguna es presentada en la Figura 6-4. Al igual que en el modelo de operación histórica esta es aplicada vía el paquete TIB de forma homogénea a toda el área del depósito. Las cotas de laguna están asociadas a una capa o periodo de stress específico, tal como se indica en la Tabla 6-1 y en el Anexo D, entre periodos la cota de laguna se mantiene constante.

Figura 6-4: Evolución de la cota de laguna de aguas claras (900K m³) en período histórico y de simulación



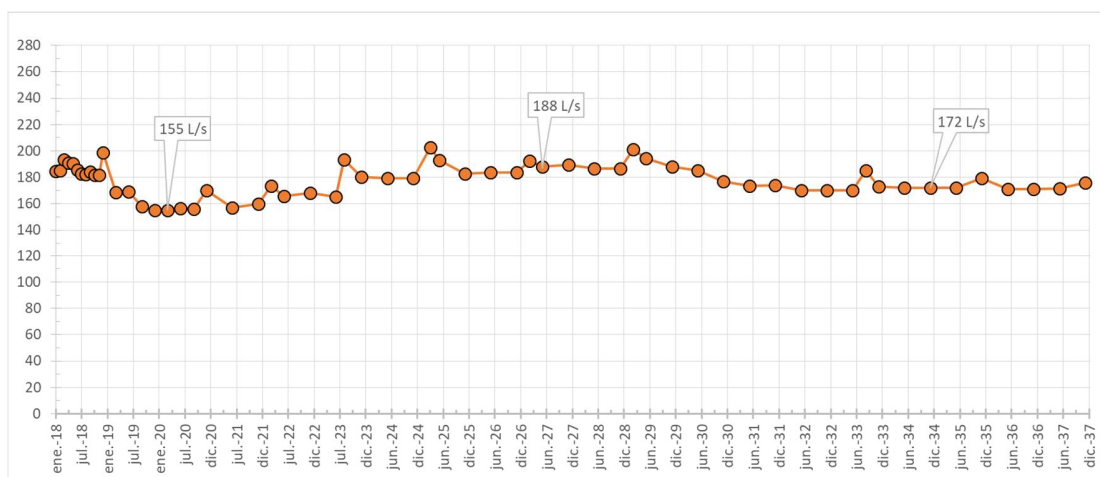
Fuente: elaboración propia con datos de operacionales de MLCC y de Ref. 5

6.3 Resultados

6.3.1 Infiltración proyectada

La infiltración proyectada para el DLLB en el período 2018 a 2037 es presentada en la Figura 6-5. Los resultados indican que esta oscilaría entre los 155 a 190 L/s durante la operación proyectada.

Figura 6-5: Infiltración estimada para el DLLB período 2018 a 2037



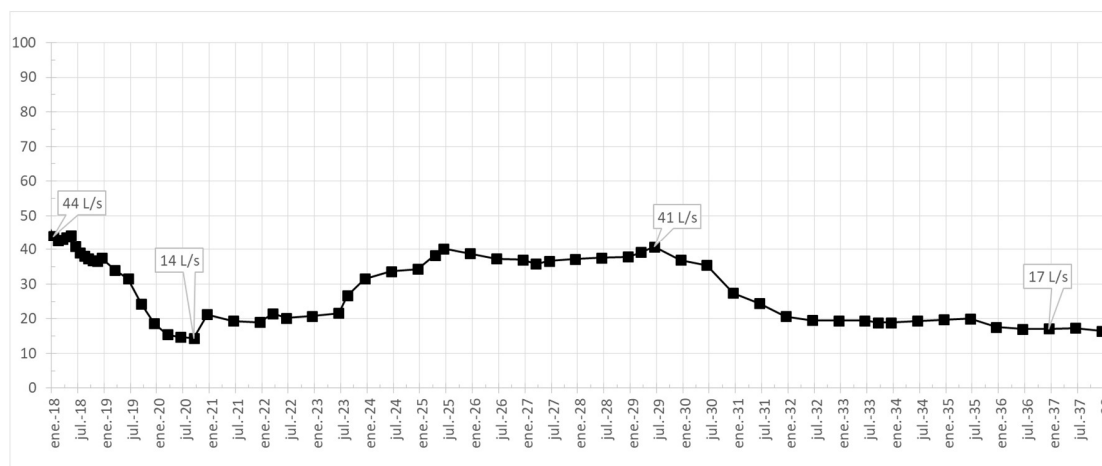
Fuente: elaboración propia

6.3.2 Caudal captado por el sistema de drenaje del muro principal

El caudal total que captarían los drenes del muro varía entre 14 a 45 L/s aproximadamente. La Figura 6-6 muestra la evolución temporal de este caudal. Inicialmente se observa una disminución del caudal del dren desde los 44 L/s llegando a un valor mínimo de 14 L/s durante el primer semestre del 2020. Posterior a esto, el caudal del dren se incrementa nuevamente hasta alcanzar valores en torno a 40 L/s hacia el primer semestre del 2025, manteniéndose relativamente constante hasta el año 2029, donde inicia una nueva disminución hasta los 17 L/s al término de la operación. Las variaciones experimenta

el dren se producen por el crecimiento del depósito, los cambios de las permeabilidades de las lamas (consolidación) como el efecto del bombeo de los pozos PRLB 10 a 14, cercanos al muro.

Figura 6-6: Caudal captado por el sistema de drenaje del DLLB periodo 2018 a 2037



Fuente: elaboración propia

6.3.3 Permeabilidades de las lamas al final de la simulación

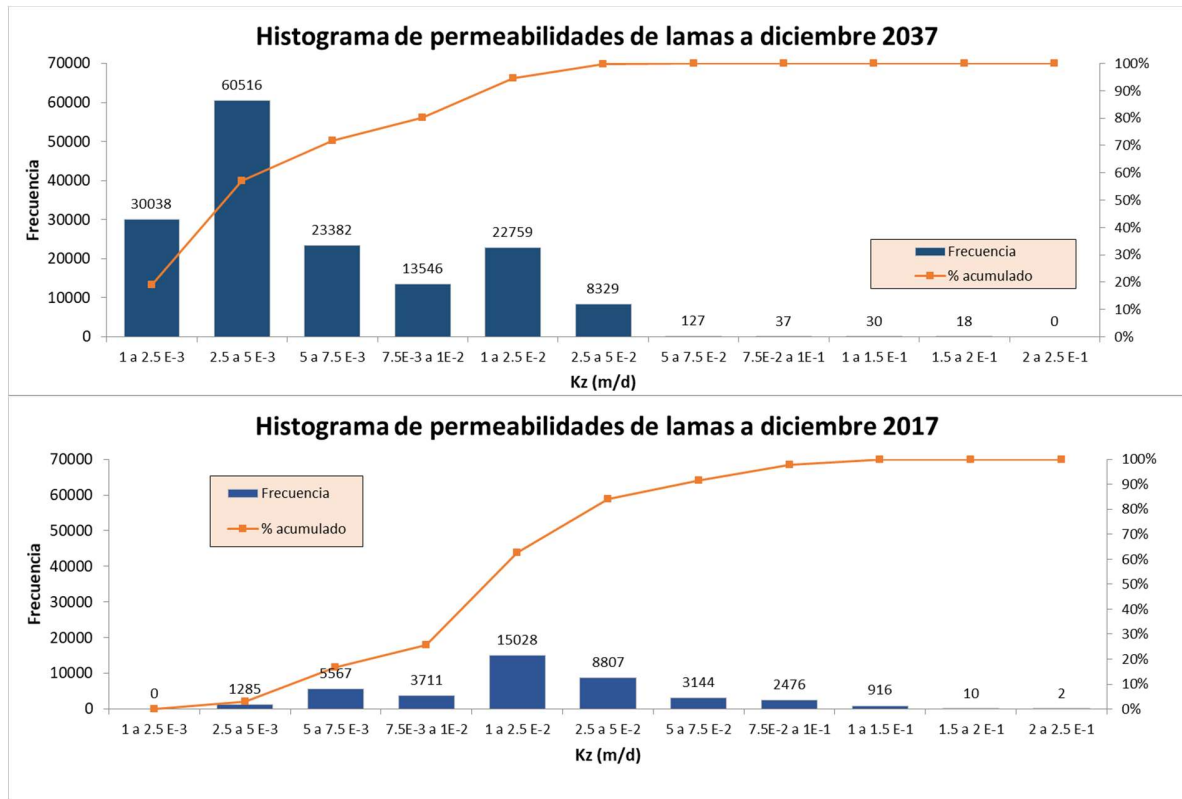
Se construyó un histograma para analizar la distribución de las permeabilidades de lamas dentro del depósito una vez terminada la operación, Figura 6-7 muestra esto. Además incluye el histograma de permeabilidades a diciembre 2017, pero modificado para que las clases sean las mismas con las de diciembre 2037, facilitando la comparación.

En primer lugar, se verifica que el promedio de las permeabilidades se redujo desde $2,78E-2$ m/d hasta $7,2E-3$ m/d, lo cual significa una disminución de casi medio orden de magnitud. El valor máximo de permeabilidad es de $1,9E-1$ m/d, mientras que el mínimo es $1,65E-3$ m/d valor que es consistente con una columna de 250 m (profundidad máxima del relave a diciembre 2037), de acuerdo a lo mostrado en la Figura 4-13.

También se verifica que prácticamente el 95% de los datos está en el rango $1E-3$ m/d a $2.5E-2$ m/d. Al comparar con las permeabilidades de diciembre 2017 se observa claramente el efecto de la disminución de la permeabilidad de las lamas en el tiempo, ya que la clase de mayor frecuencia pasó de ser la 1 a $2.5 E-2$ m/d en diciembre 2017 a 2.5 a $5 E-3$ (medio orden de magnitud de reducción).

Esto que si bien la depositación continua de relaves ha disminuido la permeabilidad de las columnas de lamas más cercanas al muro, la infiltración es controlada por las columnas de menor espesor que se ubican en la cola del depósito las cuales tienen permeabilidades superiores a $1E-2$ m/d (casi un 20% de ellas).

Figura 6-7: Comparación entre la permeabilidad vertical (Kz) de lamas a diciembre 2037 (arriba) con diciembre (abajo)



Fuente: elaboración propia

7 SIMULACIÓN PERÍODO DE CIERRE

7.1 Generalidades

La simulación de para el período de Cierre considera:

- El cese del llenado del depósito (no se incluyen ingresos adicionales de agua).
- Que la laguna operacional se reduce por completo durante el año 38, luego la infiltración está dominada por el agua contenida en las lamas.
- Una simulación de 500 años (2038 a 2537).

Para esta etapa de la modelación la estimación de infiltración se hace considerando 2 procesos:

- Infiltración por drenaje gravitacional del agua almacenada en el depósito ("*draindown*"), estimada con el modelo de infiltraciones presentado en los puntos anteriores.
- Agua liberada por consolidación (estruje), posterior al término del llenado del depósito, la cual es estimada empleando el software FSCONSOL.

En el punto siguiente se describe la configuración adoptada para la estimación de infiltración por estruje en el cierre y posteriormente se presentan los resultados de ambas estimaciones y el valor total.

7.2 Potencial de infiltración por consolidación de deformación finita

El análisis de la consolidación unidimensional de una capa de suelo fino que incrementa su espesor en el tiempo fue abordado por Gibson en el año 1958. El análisis utiliza el modelo clásico de Terzaghi, planteado de una forma más general. En efecto, el modelo de Gibson, a diferencia del modelo clásico de Terzaghi, no admite la hipótesis de pequeñas deformaciones y considera variable durante el proceso de consolidación, tanto la permeabilidad como el módulo de compresibilidad del esqueleto sólido.

Como herramienta de cálculo, se utilizó el software FSCONSOL versión 3, el cual permite estimar el grado de consolidación unidimensional de las lamas en el tiempo, basado en la teoría de consolidación de deformación finita. Para esto, el software simula el llenado del depósito, incorporando los progresivos aumentos de la altura de las lamas depositadas y el área de inundación a lo largo de la operación (Ref. 5).

A partir de la información proporcionada, el software incorpora en la modelación el efecto de consolidación a largo plazo de las lamas, obteniendo, entre otras, las siguientes variables:

- Altura del material de relave.
- Contenido de sólidos (C_p).
- Exceso de presiones de poros.
- Presiones efectivas.
- Evolución del índice de vacío en profundidad para un tiempo específico.
- Flujo por la base (cuando la base es permeable).

Las hipótesis de cálculo aplicadas en la estimación de las filtraciones por consolidación, mediante el software FSCONSOL, son las siguientes:

- El escurrimiento del agua es unidimensional, es decir, se asume un escurrimiento hacia la laguna de aguas claras o hacia el contacto del relave con el suelo natural.
- El material depositado está 100% saturado.
- El exceso de presiones de poros en la base del depósito es nulo al término de la consolidación.
- El periodo de análisis es de 300 años.
- El área del depósito es variable en función de su altura.

Para los análisis realizados se utilizaron los siguientes inputs:

- **Área:** en la Tabla se muestra la variación del área del depósito en función de altura.

Tabla 7-1 : Área de la superficie libre del relave para distintas cotas de llenado (Ref. 5)

Cota superior (m.s.n.m.)	Área (m ²)	Cota superior (m.s.n.m.)	Área (m ²)	Cota superior (m.s.n.m.)	Área (m ²)
2.750	0	2.840	656.000	2.930	2.311.000
2.760	62.000	2.850	785.000	2.940	2.533.000
2.770	115.000	2.860	931.000	2.950	2.749.000
2.780	167.000	2.870	1.092.000	2.960	2.956.000
2.790	224.000	2.880	1.268.000	2.970	3.148.000
2.800	287.000	2.890	1.458.000	2.980	3.318.000
2.810	359.000	2.900	1.660.000	2.990	3.462.000
2.820	444.000	2.910	1.871.000	3.000	3.571.000
2.830	543.000	2.920	2.090.000	-	-

Fuente: elaboración propia en base a datos de Ref. 5

- **Tasa de Depositación de relave:** La tasa de depositación de relave del Depósito de Lamas La Brea por cada año desde el 2014 hasta el 2037 (año de cierre) se muestra en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2 : Tasa de depositación del relave cada año (Ref. 5)

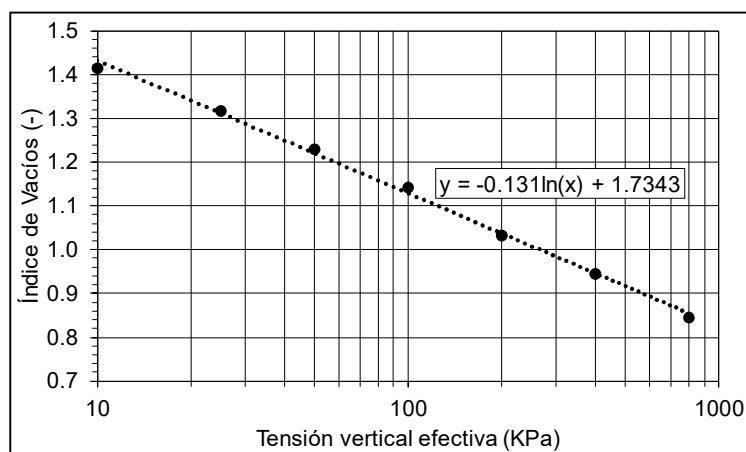
Año	Tasa (kgpd)	Año	Tasa (kgpd)	Año	Tasa (kgpd)
2014	5.440.000	2022	70.300.000	2030	74.000.000
2015	27.676.593	2023	74.000.000	2031	74.000.000
2016	39.715.197	2024	74.200.000	2032	74.200.000
2017	52.365.077	2025	74.000.000	2033	74.000.000
2018	57.194.468	2026	74.000.000	2034	74.000.000
2019	70.400.000	2027	74.000.000	2035	74.000.000
2020	68.100.000	2028	74.200.000	2036	74.200.000
2021	67.400.000	2029	74.000.000	2037	74.000.000

Fuente: elaboración propia en base a datos de Ref. 5

- **Permeabilidad:** la relación entre la permeabilidad (k) y el índice de vacíos (e) se estimó de una batería de ensayos ejecutados en laboratorio con muestras de lamas (Ref. 4). Los ensayos fueron ejecutados, tanto con materiales compactados, como con probetas montadas como *slurry*, de este modo se logra la variación del índice de vacíos (Figura 4-7).

- **Consolidación edométrica:** mediante pruebas de consolidación se establece una relación entre las tensiones verticales efectivas y el índice de vacíos (Ref. 4). En la Figura 7-1 se presenta la curva adoptada.

Figura 7-1: Tensión Vertical Efectiva (σ_v') v/s el Índice de Vacíos (e)



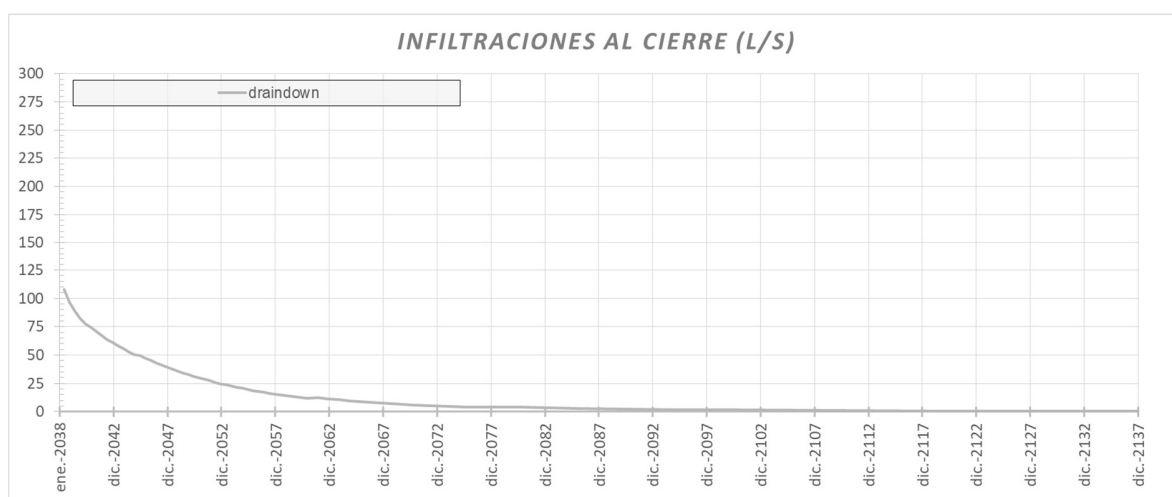
Fuente: elaboración propia en base a datos de Ref. 4

7.3 Resultados

Infiltración por flujo gravitacional

La infiltración estimada producto del drenaje del agua almacenada ("draindown") es presentada en la Figura 7-2. Se calcula un volumen total drenado de 38,3 Mm³.

Figura 7-2: Caudal de infiltración para el cierre del DLLB ("draindown")

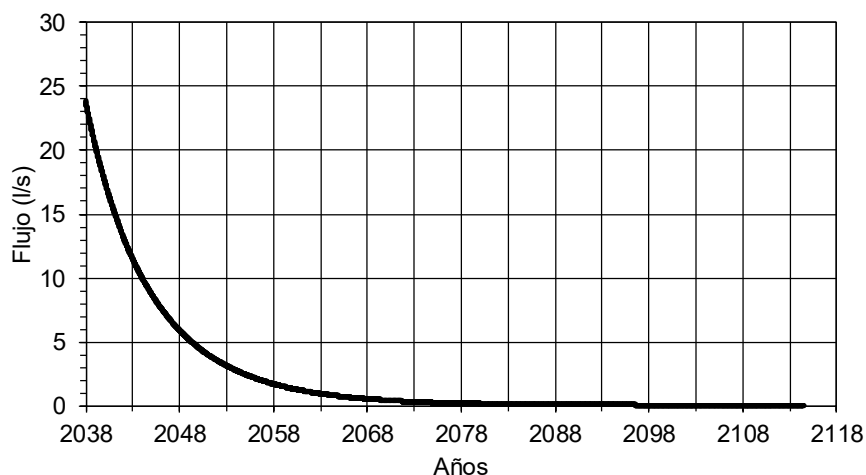


Fuente: elaboración propia

Infiltración por consolidación (estruje)

La Figura 7-3 presenta la estimación del potencial caudal evacuado por efectos de la consolidación de las lamas (estruje), en función del tiempo, obtenido a partir del modelamiento con FSCONSOL. Los resultados indican un volumen total drenado de 5.5 Mm³.

Figura 7-3: Caudal de infiltración por consolidación para el cierre del DLLB

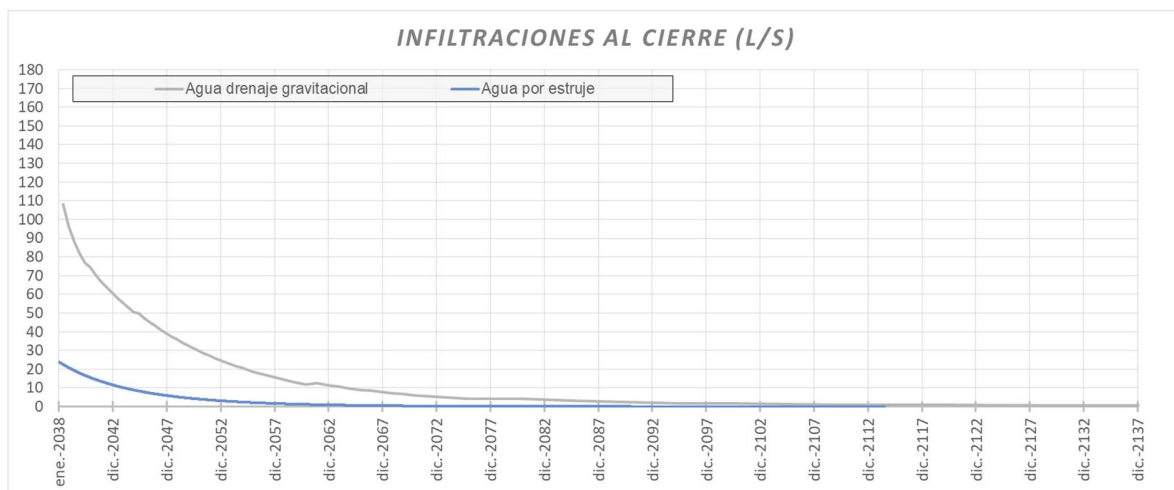


Fuente: elaboración propia

Curva combinada

Al sumar ambos efectos se obtiene un caudal máximo de 135 L/s durante el año 2018, el cual decrece a valores menores a 1 L/s antes de 100 años. El volumen total drenado corresponde 43,8 Mm³. Luego el total de agua retenida en el depósito sería de 142 Mm³, lo que significa una humedad gravimétrica de 24% lo cual es consistente con la literatura técnica para un relava con similar contenido de finos (85%) (Ver Figura 7-5).

Figura 7-4: Caudal de infiltración combinado para el cierre del DLLB



Fuente: elaboración propia

Figura 7-5: Humedad de retención para diferentes depósitos de relaves en Chile (Verdugo, et. al, 2017)

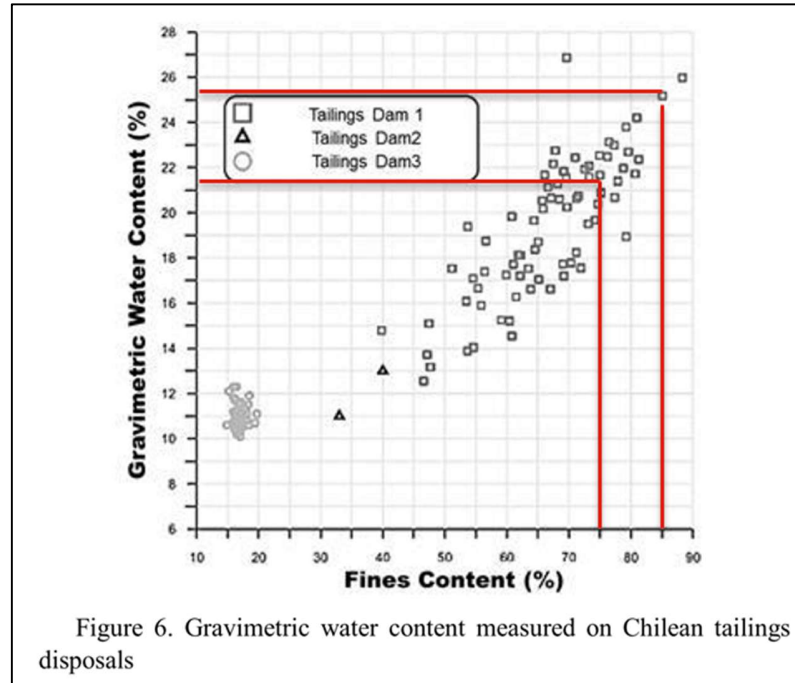


Figure 6. Gravimetric water content measured on Chilean tailings disposals

Fuente: Ref. 13

8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se actualizó el modelo considerando información de niveles, bombeos, caudal del aforador a diciembre 2017 incluyendo la caracterización de las lamas actualmente depositadas en el DLLB. Al mismo tiempo se introdujo una importante mejora en la forma en que la reducción de la permeabilidad de las lamas fue modelada.

Sobre esta base el modelo fue recalibrado, logrando una representación razonable para el comportamiento del aforador y de los niveles en pozos ubicados aguas abajo del muro y aguas arriba de la zanja cortafuga. En estas condiciones el modelo estima una infiltración para la operación histórica que oscila entre 80 a 260 L/s, con un promedio de 159 L/s para todo el período modelado. Al mismo tiempo, se estima un caudal subterráneo del orden de 110 a 120 L/s que fluye aguas abajo de los drenes, hasta mayo 2017, cuando entraron en operación los pozos PRLB 10 a 14, lo cuales han logrado reducir este caudal a la mitad.

La simulación de la operación proyectada muestra que la infiltración oscilaría entre 155 L/s a 190 L/s y la captación de agua del dren entre 14 a 45 L/s, mostrando una tendencia a la disminución desde el año 2029 para llegar a 17 L/s. La reducción de la captación del dren se asocia la reducción de la permeabilidad del relave en el tiempo y al hecho que el agua es captada por los pozos de extracción cercanos al muro.

En el período de cierre la infiltración inicia en 135 L/s para el año 2038, llegando a valores inferiores a 1 L/s antes de 100 años, esto considerando el efecto del “draindown” (drenaje de agua almacenada) como el efecto del estruje (consolidación post término del llenado).

ANEXO A**DISCRETIZACIÓN TEMPORAL MODELO DE INFILTRACIONES ACTUALIZADO A DIC 2017**

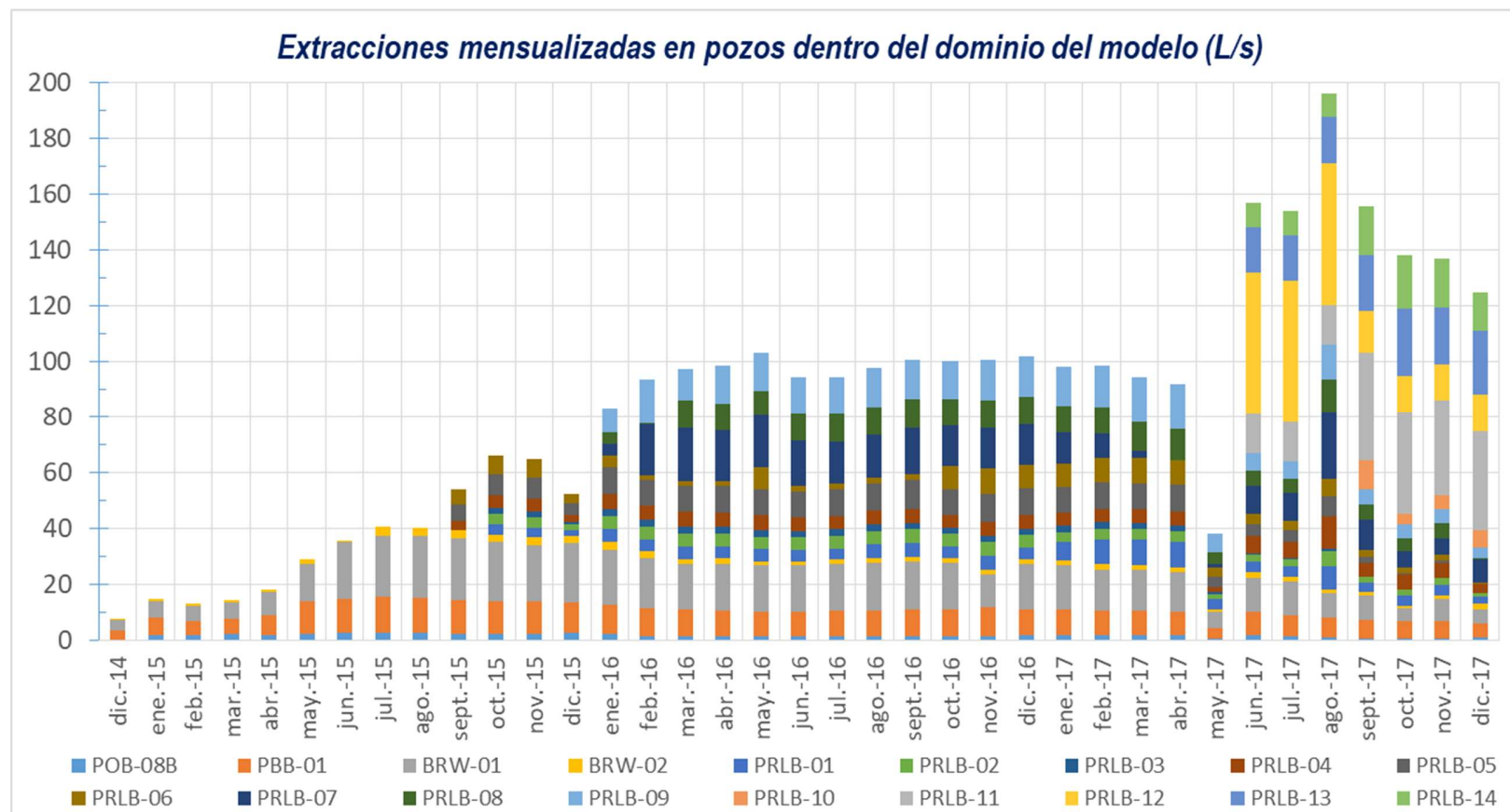
Período de Stress	Fecha	Duración	Días Ac.	Observación
1	SS	1	1	SS: período " <i>steady state</i> " (condición inicial para simulación transiente)
2	ene-14	31	32	Inicio simulación transiente: No hay activación de capas de relave
3	feb-14	28	60	No hay activación de capas de relave
4	mar-14	31	91	No hay activación de capas de relave
5	abr-14	30	121	No hay activación de capas de relave
6	may-14	31	152	Capa 95 (inicio operación DLLB / solo laguna)
7	jun-14	30	182	Capa 94 (inicia depositación de lamas)
8	jul-14	31	213	Capa 93
9	ago-14	31	244	Capa 92
10	sept-14	30	274	Capa 91
11	oct-14	31	305	Capa 90
12	nov-14	30	335	Capa 89
13	dic-14	31	366	Capa 88
14	ene-15	31	397	Capa 87
15	feb-15	28	425	Capa 86
16	mar-15	31	456	Capa 85
17	abr-15	30	486	Capa 84
18	may-15	31	517	Capa 83
19	jun-15	30	547	Capa 82
20	jul-15	31	578	Capa 81
21	ago-15	31	609	Capa 80
22	sept-15	30	639	Capa 79
23	oct-15	31	670	Capa 78
24	nov-15	30	700	Capa 77
25	dic-15	31	731	Capa 76
26	ene-16	31	762	Capa 75
27	feb-16	29	791	Capa 74
28	mar-16	31	822	Capa 73
29	abr-16	30	852	Capa 72
30	may-16	31	883	Capa 71
31	jun-16	30	913	Capa 70
32	jul-16	31	944	Capa 69
33	ago-16	31	975	Capa 68
34	sept-16	30	1005	Capa 67
35	oct-16	31	1036	Capa 66
36	nov-16	30	1066	Capa 65
37	dic-16	31	1097	Capa 64
38*	ene-17	31	1128	Capa 63
39*	feb-17	28	1156	Capa 62
40*	mar-17	31	1187	Capa 61

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Período de Stress	Fecha	Duración	Días Ac.	Observación
41*	abr-17	30	1217	Capa 60
42*	may-17	31	1248	Capa 59
43*	jun-17	30	1278	Capa 58
44*	jul-17	31	1309	Capa 57
45*	ago-17	31	1340	Capa 56
46*	sept-17	30	1370	Capa 55
47*	oct-17	31	1401	Capa 54
48*	nov-17	30	1431	Capa 53
49*	dic-17	31	1462	Capa 52

*: Períodos de stress incorporados en la presente actualización

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B**ESTADÍSTICA DE EXTRACCIONES POR POZO DE BOMBEO DE MLCC**

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Fecha	POB-08B	PBB-01	BRW-01	BRW-02	PRLB-01	PRLB-02	PRLB-03	PRLB-04	PRLB-05	PRLB-06	PRLB-07	PRLB-08	PRLB-09	PRLB-10	PRLB-11	PRLB-12	PRLB-13	PRLB-14
dic-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ene-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
feb-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mar-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
abr-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
may-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jun-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jul-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ago-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sept-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
oct-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nov-14	0.0	0.0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dic-14	0.1	3.2	3.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ene-15	1.9	6.1	6.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb-15	1.7	5.3	5.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-15	2.1	5.5	5.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-15	1.6	7.3	8.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-15	2.3	11.4	13.6	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-15	2.6	12.0	20.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-15	2.7	12.8	21.9	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-15	2.5	12.5	22.1	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sept-15	2.1	12.1	22.1	2.9	0.0	0.0	0.0	3.5	6.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-15	2.1	11.6	21.3	2.8	3.5	3.9	1.9	4.7	7.7	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-15	2.3	11.5	20.2	2.7	3.5	3.9	2.1	4.4	7.6	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dic-15	2.5	11.1	21.0	2.8	1.9	2.0	1.1	2.4	4.2	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ene-16	2.3	10.3	19.9	2.7	4.51	4.87	2.50	5.24	9.57	4.43	4.23	3.76	8.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb-16	1.2	10.1	18.0	2.4	4.29	4.61	2.40	5.09	9.17	1.59	18.27	0.77	15.61	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-16	1.3	9.5	16.2	1.8	4.45	4.77	2.46	5.31	9.44	1.60	19.20	10.01	11.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Fecha	POB-08B	PBB-01	BRW-01	BRW-02	PRLB-01	PRLB-02	PRLB-03	PRLB-04	PRLB-05	PRLB-06	PRLB-07	PRLB-08	PRLB-09	PRLB-10	PRLB-11	PRLB-12	PRLB-13	PRLB-14
abr-16	1.2	9.4	16.8	1.8	4.36	4.64	2.34	5.14	9.34	1.93	18.18	9.74	13.74	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-16	1.2	9.0	16.4	1.6	4.24	4.46	2.39	5.26	9.41	7.95	18.79	8.51	13.91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-16	1.2	9.0	16.5	1.5	4.18	4.37	2.31	4.73	9.21	2.34	15.86	9.73	13.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-16	1.3	9.1	16.9	1.6	3.79	4.64	2.32	4.80	9.43	2.31	14.92	9.88	13.47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-16	1.5	9.2	16.9	1.7	4.92	4.90	2.31	4.87	9.69	2.31	15.36	10.06	14.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sept-16	1.5	9.5	17.2	1.7	4.76	4.96	2.41	5.02	10.04	2.41	16.47	10.33	14.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-16	1.4	9.4	16.8	1.6	4.33	4.50	2.20	4.61	9.13	8.28	14.79	9.44	13.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-16	1.5	10.2	11.7	1.8	4.95	4.90	2.26	4.81	9.97	9.15	14.74	9.88	14.96	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dic-16	1.8	9.2	16.1	1.6	4.40	4.40	2.34	5.01	9.64	8.34	14.54	9.78	14.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ene-17	1.8	9.2	15.7	1.8	6.66	3.54	2.17	4.69	9.11	8.30	11.51	9.35	14.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb-17	1.8	8.9	14.7	1.9	8.70	3.97	2.25	4.78	9.48	8.77	8.70	9.48	15.07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-17	1.9	8.8	14.4	2.0	8.88	3.76	2.23	4.84	9.41	8.91	2.80	10.25	16.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-17	1.8	8.5	13.8	2.0	9.09	3.71	2.26	4.86	9.51	8.92	0.00	11.05	16.54	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-17	0.7	3.4	6.0	1.0	3.71	1.42	0.84	1.87	3.67	3.25	1.21	4.24	6.52	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-17	1.8	8.3	12.3	2.0	3.70	2.66	0.33	6.26	4.18	3.53	10.14	5.41	6.27	0.0	14.1	50.9	16.4	8.7
jul-17	1.3	7.7	12.2	1.6	3.58	2.57	0.32	6.06	4.05	3.42	9.81	5.24	6.07	0.0	14.1	50.9	16.4	8.7
ago-17	1.1	6.9	8.8	1.4	8.26	5.52	0.68	11.64	7.14	6.33	23.53	12.29	12.62	0.0	14.1	50.9	16.4	8.7
sept-17	0.6	6.6	8.7	1.3	3.40	2.03	0.00	5.18	2.09	2.48	10.61	5.35	5.54	10.4	38.8	15.0	20.1	17.7
oct-17	0.6	6.2	4.6	0.9	3.67	2.20	0.00	5.29	0.41	2.31	5.70	4.64	4.85	3.7	36.5	13.2	24.5	19.0
nov-17	0.6	6.1	8.1	1.3	3.87	2.38	0.00	5.45	0.82	2.15	5.62	5.31	5.12	5.2	33.9	13.1	20.3	17.8
dic-17	0.9	5.0	5.2	1.7	2.50	1.41	0.00	3.19	0.27	0.30	8.19	0.48	4.03	6.1	35.5	13.3	22.7	13.8

Fuente: datos de MLCC

ANEXO C**CAUDAL DE INFILTRACIÓN POR UNIDAD HIDROGEOLÓGICA Y CAUDAL SIMULADO PARA EL SISTEMA DE DRENAJE**

FECHA	INFILTRACION (L/s)										Dren (L/s)	
	Bas	Aluv_Prin	Andesita	Lavas_sup	Rx_Norte	Arenisca	Rx_Centro	Aluv_LB	Aluv_CSN	TOTAL	Aforador	Modelo
dic-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
ene-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
feb-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
mar-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
abr-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0
may-14	0	102	0	0	0	0	1	0	0	104	*	0
jun-14	0	110	0	0	0	0	3	0	0	113	*	0
jul-14	0	108	0	0	0	0	6	0	0	114	5	0
ago-14	0	74	0	0	0	0	9	0	0	83	9	0
sept-14	0	72	0	0	0	0	13	99	0	184	18	2
oct-14	0	70	0	0	0	0	13	122	0	206	25	61
nov-14	0	68	0	0	0	0	18	79	0	165	43	63
dic-14	0	42	0	0	0	0	17	35	0	95	32	39
ene-15	0	62	0	0	1	0	16	48	1	128	26	27
feb-15	0	62	0	0	3	0	17	55	1	137	21	25
mar-15	0	39	0	0	6	0	16	49	1	112	20	22
abr-15	0	57	0	0	6	0	17	68	1	149	23	24
may-15	0	42	0	0	6	0	17	37	2	104	21	22
jun-15	0	40	0	0	4	0	18	39	2	104	18	17
jul-15	0	50	0	0	6	0	20	52	2	130	17	16
ago-15	0	45	0	0	11	0	19	40	2	117	19	17
sept-15	0	64	0	0	9	0	17	55	4	150	21	20
oct-15	0	63	0	0	11	0	17	81	4	177	28	30
nov-15	0	61	0	0	16	0	18	59	5	159	38	40
dic-15	0	64	0	0	18	0	17	91	8	198	60	57
ene-16	0	33	1	0	15	0	18	57	5	129	59	53
feb-16	0	68	1	0	18	0	19	92	8	206	62	63
mar-16	0	57	1	0	22	0	20	70	13	182	66	67

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

FECHA	INFILTRACION (L/s)										Dren (L/s)	
	Bas	Aluv_Prin	Andesita	Lavas_sup	Rx_Norte	Arenisca	Rx_Centro	Aluv_LB	Aluv_CSN	TOTAL	Aforador	Modelo
abr-16	0	40	1	0	16	0	20	32	9	116	62	54
may-16	0	53	1	0	25	0	21	76	17	194	62	55
jun-16	0	42	1	0	20	0	22	47	20	153	54	50
jul-16	0	70	1	0	20	0	23	44	22	180	55	48
ago-16	0	75	1	0	18	0	21	54	16	184	52	51
sept-16	0	40	1	0	18	0	23	48	15	145	61	50
oct-16	0	61	1	0	21	0	23	46	15	167	56	51
nov-16	1	52	1	0	20	0	25	42	17	156	55	51
dic-16	0	57	1	0	19	0	25	64	15	181	54	55
ene-17	1	64	1	0	17	0	24	52	15	174	53	60
feb-17	1	45	1	0	15	0	25	44	11	140	58	57
mar-17	1	43	1	0	15	0	25	38	11	133	48	48
abr-17	1	65	1	0	14	0	26	40	9	157	23	43
may-17	1	93	1	0	18	0	25	60	11	208	22	51
jun-17	1	89	1	0	19	0	24	64	12	209	27	37
jul-17	0	99	1	0	22	0	23	103	11	259	46	59
ago-17	0	83	1	0	19	0	24	77	10	216	54	66
sept-17	0	84	1	0	20	0	25	70	9	210	52	58
oct-17	0	56	1	0	18	0	27	61	9	173	80	50
nov-17	0	79	1	0	21	0	28	67	9	205	53	50
dic-17	1	65	1	0	19	0	27	58	9	181	19	45

*: DLL no estaba en operación

Fuente: elaboración propia / datos del aforador son promedio mensual de la información provista por MLCC

ANEXO D**DISCRETIZACIÓN TEMPORAL MODELO DE SIMULACIÓN OPERACIÓN PROYECTADA**

Período de Stress	Fecha	Duración	Días Acumulados	Activación de capas para representar crecimiento del DLLB
1	SS	1	1	SS: período "steady state" (condición inicial para simulación transiente)
2	ene-14	31	32	Inicio simulación transiente: No hay activación de capas de relave
3	feb-14	28	60	No hay activación de capas de relave
4	mar-14	31	91	No hay activación de capas de relave
5	abr-14	30	121	No hay activación de capas de relave
6	may-14	31	152	Capa 95 (inicio operación DLLB / solo laguna)
7	jun-14	30	182	Capa 94 (inicia depositación de lamas)
8	jul-14	31	213	Capa 93
9	ago-14	31	244	Capa 92
10	sept-14	30	274	Capa 91
11	oct-14	31	305	Capa 90
12	nov-14	30	335	Capa 89
13	dic-14	31	366	Capa 88
14	ene-15	31	397	Capa 87
15	feb-15	28	425	Capa 86
16	mar-15	31	456	Capa 85
17	abr-15	30	486	Capa 84
18	may-15	31	517	Capa 83
19	jun-15	30	547	Capa 82
20	jul-15	31	578	Capa 81
21	ago-15	31	609	Capa 80
22	sept-15	30	639	Capa 79
23	oct-15	31	670	Capa 78
24	nov-15	30	700	Capa 77
25	dic-15	31	731	Capa 76
26	ene-16	31	762	Capa 75
27	feb-16	29	791	Capa 74
28	mar-16	31	822	Capa 73
29	abr-16	30	852	Capa 72
30	may-16	31	883	Capa 71
31	jun-16	30	913	Capa 70
32	jul-16	31	944	Capa 69
33	ago-16	31	975	Capa 68
34	sept-16	30	1005	Capa 67
35	oct-16	31	1036	Capa 66
36	nov-16	30	1066	Capa 65
37	dic-16	31	1097	Capa 64
38	ene-17	31	1128	Capa 63
39	feb-17	28	1156	Capa 62
40	mar-17	31	1187	Capa 61
41	abr-17	30	1217	Capa 60
42	may-17	31	1248	Capa 59

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Período de Stress	Fecha	Duración	Días Acumulados	Activación de capas para representar crecimiento del DLLB
43	jun-17	30	1278	Capa 58
44	jul-17	31	1309	Capa 57
45	ago-17	31	1340	Capa 56
46	sept-17	30	1370	Capa 55
47	oct-17	31	1401	Capa 54
48	nov-17	30	1431	Capa 53
49	dic-17	31	1462	Capa 52
50	ene-18	31	1493	Capa 51
51	feb-18	28	1521	
52	mar-18	31	1552	
53	abr-18	30	1582	Capa 50
54	may-18	31	1613	
55	jun-18	30	1643	
56	jul-18	31	1674	Capa 49
57	ago-18	31	1705	
58	sept-18	30	1735	
59	oct-18	31	1766	Capa 48
60	nov-18	30	1796	
61	dic-18	31	1827	
62	mar-19	90	1917	Capa 47
63	jun-19	92	2009	Capa 46
64	sept-19	92	2101	Capa 45
65	dic-19	91	2192	Capa 44
66	mar-20	91	2283	Capa 43
67	jun-20	92	2375	
68	sept-20	92	2467	
69	dic-20	91	2558	Capa 42
70	jun-21	182	2740	Capa 41
71	dic-21	183	2923	Capa 40
72	mar-22	90	3013	
73	jun-22	92	3105	
74	dic-22	183	3288	Capa 39
75	jun-23	182	3470	Capa 38
76	ago-23	61	3531	Capa 37
77	dic-23	122	3653	
78	jun-24	183	3836	
79	dic-24	183	4019	Capa 36
80	abr-25	121	4140	
81	jun-25	61	4201	
82	dic-25	183	4384	Capa 35
83	jun-26	182	4566	Capa 34
84	dic-26	183	4749	
85	mar-27	90	4839	
86	jun-27	92	4931	Capa 33
87	dic-27	183	5114	
88	jun-28	183	5297	
89	dic-28	183	5480	

5031 INGENIERÍA PARA EIA DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA CASERONES

Período de Stress	Fecha	Duración	Días Acumulados	Activación de capas para representar crecimiento del DLLB
90	mar-29	90	5570	Capa 32
91	jun-29	92	5662	
92	dic-29	183	5845	
93	jun-30	182	6027	Capa 31
94	dic-30	183	6210	
95	jun-31	182	6392	Capa 30
96	dic-31	183	6575	
97	jun-32	183	6758	Capa 29
98	dic-32	183	6941	
99	jun-33	182	7123	Capa 28
100	sept-33	92	7215	
101	dic-33	91	7306	
102	jun-34	182	7488	Capa 27
103	dic-34	183	7671	
104	jun-35	182	7853	Capa 26
105	dic-35	183	8036	
106	jun-36	183	8219	Capa 25
107	dic-36	183	8402	
108	jun-37	182	8584	Capa 24
109	dic-37	183	8767	

Fuente: elaboración propia

Arcadis

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

arcadis.com

A decorative graphic consisting of three thin orange lines. One line is horizontal, extending across the width of the page. Two other lines are diagonal, starting from the bottom left and extending towards the top right, intersecting the horizontal line.