



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO EN SISTEMAS
PARCIALMENTE SATURADOS: INFILTRACIÓN EN PILAS DE
RELAVES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JUAN CRISTÓBAL GARRETÓN LAZCANO

PROFESOR GUÍA:

DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BEATRIZ LABARCA LIRA

SASKIA ROELS KARSTEL

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN

El depósito de relaves estudiado ha presentado dificultades operacionales para mantener el contenido de sólidos de diseño, correspondiente a un 65%, por lo que se ha solicitado una extensión del Plan de Adaptación Operacional (PAO).

La inquietud se debe a la posible infiltración de flujos provenientes del depósito hacia el suelo subyacente, lo cual podría tener implicancias medioambientales. Esto, debido al mayor contenido de agua al disminuir el porcentaje de sólidos.

Por lo anterior, se ha solicitado una evaluación de la actual infiltración de humedad, mediante estudios de terreno y la construcción de un modelo numérico.

La campaña de terreno ha incluido geofísica, excavación de calicatas, perforación de sondajes sínicos, mediciones *in-situ* y toma de muestras para análisis de laboratorio.

Una vez caracterizado el depósito de relaves y el suelo subyacente, se ha construido un modelo numérico 1D, el cual mediante una columna representativa busca reflejar la situación actual y validar las observaciones de terreno. Este tipo de modelo fue aplicable en este caso dada la relativa homogeneidad del medio, la ausencia de formación de lagunas de acumulación de agua y dado el objetivo de evaluar la infiltración vertical.

El modelo numérico, luego de ser calibrado, constituiría además una herramienta de predicción, con el cual se podrán evaluar distintas estrategias operacionales y disminuir los impactos medioambientales del depósito.

TABLA DE CONTENIDO

1	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos y alcances	1
1.3	Metodología de trabajo	2
2	MARCO CONCEPTUAL.....	3
2.1	Medio poroso parcialmente saturado	3
2.2	Depósitos de relaves espesados	4
2.3	Modelación Numérica	8
3	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	12
3.1	Marco geológico	12
3.2	Marco hidrológico.....	14
3.3	Marco hidrogeológico.....	14
4	TRABAJOS DE TERRENO.....	16
4.1	Geofísica	16
4.2	Calicatas.....	18
4.3	Sondajes.....	20
5	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	24
5.1	Descripción del material	24
5.2	Ensayos In-situ y de Laboratorio.....	25
5.3	Exploración geofísica y correlación con sondajes	31
5.4	Resultados de Humedad medida en Laboratorio	38
6	MODELO NUMÉRICO	47
6.1	Geometría y temporalidad	47
6.2	Parametrización.....	48
6.3	Validación del modelo	52
6.4	Simulación de condición futura	54
7	DISCUSIÓN	60
7.1	Obtención de datos de terreno	60
7.2	Dimensionalidad del modelo numérico.....	60
7.3	Modelación de medios parcialmente saturados.....	60
7.4	Resultados de terreno vs. Modelo numérico.....	61
7.5	Limitaciones del modelo numérico.....	61
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
9	BIBLIOGRAFÍA.....	63

1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Introducción

Un depósito de relaves espesado se caracteriza por que su material de descarga ha pasado previamente por un proceso de espesamiento, mediante el cual se obtiene una concentración de sólidos mayor al 65%, lo cual tiene una serie de ventajas económicas, operacionales y medioambientales. En Chile, según el último catastro realizado por el SERNAGEOMIN (diciembre 2016), este tipo de depósitos constituye tan solo el 0,6% de los existentes en el país. Se espera que, con los avances tecnológicos y la creciente literatura al respecto, este tipo de depósitos aumente no sólo en el país sino globalmente.

Una de las ventajas medioambientales de los depósitos de relaves espesados es su bajo contenido de agua, el cual elimina las tradicionales lagunas de decantación y por tanto reduce la infiltración de aguas de precipitación y aguas de proceso, además de inhibir el drenaje ácido.

El Depósito de Relaves del presente estudio fue diseñado para contener un mínimo de 65% de sólidos. Las estructuras de contención, así como las medidas de mitigación de infiltración hacia el suelo natural, fueron construidas para un material de dichas características. Así mismo, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) relacionado a la actividad del depósito comprometía el cumplimiento del espesamiento de diseño.

Sin embargo, se han presentado dificultades operacionales desde sus inicios para cumplir con el % mínimo de contenido de sólidos, teniendo un promedio de 62,31%. Frente a esto, se solicitó un Plan de Adaptación Operacional (PAO), en el cual se comprometió, entre otras medidas, la construcción de muros internos de contención y la actualización de los modelos numéricos previos.

Frente a la persistente dificultad técnica de cumplir con los parámetros de diseño del relave, se realizó una solicitud de extensión de dicho PAO, ante lo cual la autoridad ambiental solicitó una serie de compromisos, los cuales conforman los trabajos realizados y presentados en el presente estudio. Estos consisten, a modo de resumen, en la actualización de los estudios realizados previamente, esta vez con datos reales del contenido de agua en relave, porosidad y espesores de las capas depositadas según operación actual, de la mano con una actualización del modelo numérico de infiltración. Dichos compromisos, en conjunto, apuntan a evaluar de forma fidedigna la humedad residual en el depósito y la potencial infiltración.

Dada -según estudios previos- la ausencia de niveles saturados en los niveles más superficiales del suelo de fundación, el modelo numérico debe responder a un comportamiento no saturado de los flujos. Los relaves espesados, además, dentro de sus características presentan una heterogeneidad muy baja y sin segregación al ser depositados, por lo que se escoge una modelación en 1D que represente flujos verticales.

1.2 Objetivos y alcances

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es determinar la existencia y/o magnitud de la infiltración de humedad desde el material de relave hacia el suelo subyacente, mediante trabajos en terreno y la posterior construcción de un modelo numérico predictivo en 1D. Luego, evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geológica e hidrogeológicamente el sector, basado en antecedentes y observaciones en terreno.
- Determinar el grado de infiltración actual por medio de ensayos in-situ y de laboratorio.

- Llevar a cabo un estudio detallado del estado actual del depósito y del suelo de fundación, en cuanto a sus espesores, litologías, heterogeneidades, contenido de humedad y sus respectivos parámetros geotécnicos (granulometría, densidad seca, porosidad, permeabilidad, etc.).
- Construcción y calibración de un modelo numérico de flujo parcialmente saturado en 1D por medio de un software especializado.
- Simular escenarios predictivos para evaluar la potencial infiltración de humedad futura y determinar estrategias para su mitigación.
- Analizar la efectividad de la modelación numérica para casos como el presentado, haciendo una comparación con lo determinado mediante análisis empíricos.

1.3 Metodología de trabajo

La primera etapa consistió en la recopilación de antecedentes. Dentro de estos, se encuentra toda la información bibliográfica referente al área de estudio, tanto geológica como hidrogeológica. Además, se contó con todos los antecedentes históricos de la operación del depósito de relaves; topografía, un registro continuo de los volúmenes totales depositados, contenido de sólidos y densidad seca, metodología general de depositación, etc.

Se realizaron visitas previas de terreno, para planificar la estrategia que permitiese estudiar de forma certera y exhaustiva el comportamiento del depósito. En primer lugar, se determinó la necesidad de realizar sondajes sísmicos, dada la importancia de mantener la humedad de las muestras intactas, así como de evitar el ingreso de agua al relave.

Luego, se llevó a cabo una primera etapa de estudios geofísicos, la cual incluyó el trazado de cuatro perfiles de Tomografía Eléctrica y diez sondajes NanoTEM, los cuales mediante el contraste de resistividades permitirían estudiar las condiciones de humedad del relave y del suelo; lo cual entregaría una primera evaluación de la potencial infiltración y permitiría definir la localización óptima de los siguientes trabajos de terreno.

Para los ensayos in-situ y la toma de muestras, se excavaron 5 calicatas y se perforaron 7 sondajes. EN todos ellos se realizaron descripciones y análisis in-situ, los que incluyeron ensayos de densidad por método de cono de arena, de penetración estándar (SPT, Standard Penetration Test) y de permeabilidad tipo Lefranc. Las muestras, en tanto, fueron enviadas a laboratorio para su clasificación granulométrica, sus límites de consistencia, la determinación de su humedad, permeabilidad, gravedad específica y densidad seca, y la definición de sus curvas de retención de humedad característica (SWCC, Soil-Water Characteristic Curve).

Una vez obtenidos los resultados, estos fueron recopilados y analizados en conjunto, para generar una caracterización exhaustiva del material de relave y suelo natural. A su vez, se analizó la congruencia de lo observado en la exploración geofísica, las descripciones litológicas realizadas en las perforaciones y los análisis de laboratorio.

Con los parámetros geotécnicos definidos y la determinación de una columna de relave/suelo representativa, se construyó un modelo numérico en 1D para representar la condición actual del depósito de relaves y del suelo subyacente, en términos de sus respectivos perfiles de contenido de humedad en profundidad.

Una vez validado el modelo de calibración, se procedió a la simulación de escenarios futuros, los cuales representasen las posibles estrategias de depositación a futuro, y se evaluaron los diferentes resultados en término de las infiltraciones proyectadas desde el relave hacia el suelo subyacente. Con esto, se entregan recomendaciones y posibles estrategias que disminuyan dicha infiltración y aseguren una operación segura tanto operacional como medioambientalmente.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Medio poroso parcialmente saturado

2.1.1 Fases

Se entiende como medio poroso a aquel compuesto por una fase sólida (matriz sólida) y una parte ocupada por huecos o espacios vacíos, los cuales pueden contener fluidos. De esta forma, aquellos suelos formados por arena, arcilla y/o grava, así como las espumas y polímeros, pertenecen a esta categoría.

Una *fase independiente* es toda aquella porción de una mezcla que cumple con i) poseer propiedades que la distinguen de los materiales contiguos y ii) contar con límites definidos (Fredlund & Rahardjo, 1993). De esta forma es fácil ver cómo en un suelo saturado, el material sólido y el agua son 2 fases independientes.

En un medio poroso parcialmente saturado (i.e., con una saturación que va desde el 0 al 100%), tradicionalmente se han descrito 3 fases: sólida, líquida y gaseosa, con estas 2 últimas ocupando los poros o espacios vacíos. Sin embargo, actualmente ha sido necesario considerar una cuarta fase; la interfaz líquido-gaseosa (i.e. la membrana contráctil), de relevancia al momento de entender ciertos mecanismos físicos (Wang & Menzies, 2007).

La capa contráctil posee una propiedad llamada *tensión superficial*, resultado de fuerzas inter-moleculares distintas a las que actúan al interior del agua. Una molécula que se encuentre dentro de esta capa contráctil se verá sujeta a fuerzas desbalanceadas hacia el interior del agua, frente a lo cual la tensión superficial actúa de forma tangencial a la superficie del agua para mantener en equilibrio esta interfaz.

Así, un medio poroso parcialmente saturado constará de cuatro fases, ilustradas en la Figura 2-1:

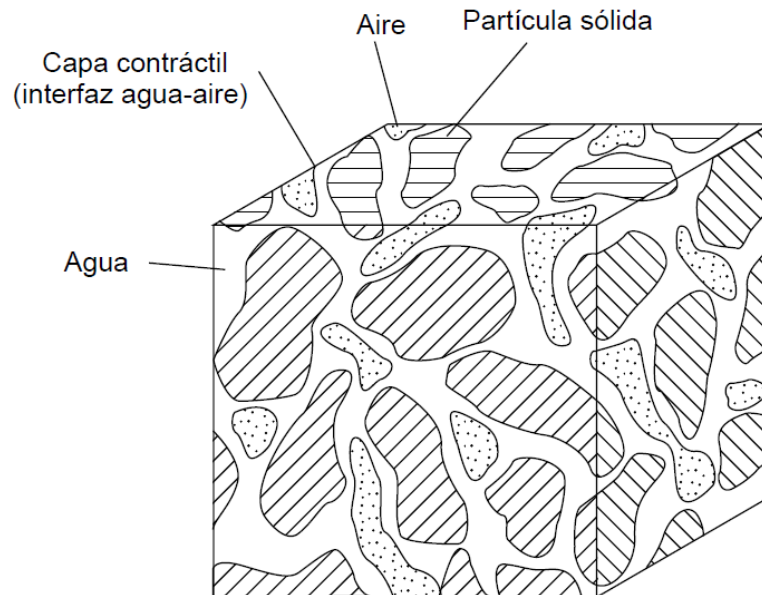


Figura 2-1: Ejemplo de medio poroso parcialmente saturado con una fase gaseosa continua (adaptado de Wang & Menzies, 2007).

- Una matriz sólida formada por un agrupamiento de granos, entre los cuales se forman poros o espacios vacíos. Es eventualmente deformable.
- Una fase líquida, la cual considera el total de líquidos presentes en el medio, y que, de ocupar la totalidad de los poros, pasa a dar forma a un medio completamente saturado.

- Una fase gaseosa, típicamente consistente de aire y vapor de agua. Esta fase puede ser continua (fluye a través de los poros) o discontinua (burbujas atrapadas dentro de la fase líquida).
- La capa contráctil, cuyo espesor es del orden de sólo unas pocas capas moleculares.

2.1.2 Zona vadosa

Típicamente, la porción de suelo comprendida entre la superficie o atmósfera y el nivel freático subyacente se ha llamado *zona vadosa* o *zona no saturada*. Hidrológicamente se trata de un sistema abierto, ya que existe un intercambio de materia desde y hacia los medios que lo adyacen. En algunas áreas el nivel freático puede estar muy cerca de la superficie, mientras que en otras la zona vadosa puede comprender cientos de metros. Las características de esta zona influirán significativamente en el movimiento y transporte tanto de agua como de elementos químicos.

En algunas áreas, esta zona puede verse fuertemente influenciada por el clima. La profundidad del nivel freático podrá variar frente a cambios estacionales, donde el flujo entrante al sistema (i.e. infiltración) y el flujo saliente (i.e. evaporación y evapotranspiración) controlarán las fluctuaciones. Un flujo neto negativo o saliente provocará un descenso progresivo de la napa freática, así como el secado, agrietamiento y desecación del medio. Un flujo neto positivo o entrante, en tanto, eventualmente saturará el medio. En la práctica, el sistema nunca se encuentra en un estado de equilibrio (Tindall & Kunkel, 1999).

2.2 Depósitos de relaves espesados

2.2.1 Generalidades

Los depósitos de relaves espesados o TTD, por sus siglas en inglés (*Thickened Tailings Disposal*), son aquellos en que el material de descarga ha sido previamente sometido a un proceso de espesamiento, logrando una concentración de sólidos de 65-72% (Watson, 2010), con el objetivo de crear un depósito auto-soportado, eliminando las limitaciones topográficas para su depositación (Robinsky, 1999) y aumentando su estabilidad estática y sísmica en comparación a los depósitos convencionales. Los avances tecnológicos para la depositación mediante este método han ido en rápido progreso desde el año 1995, ya que ofrece incentivos tanto económicos como medioambientales (Jewell et al., 2002 & 2003). La Figura 2-2 muestra una comparación esquemática entre los depósitos de relaves convencionales y los espesados.

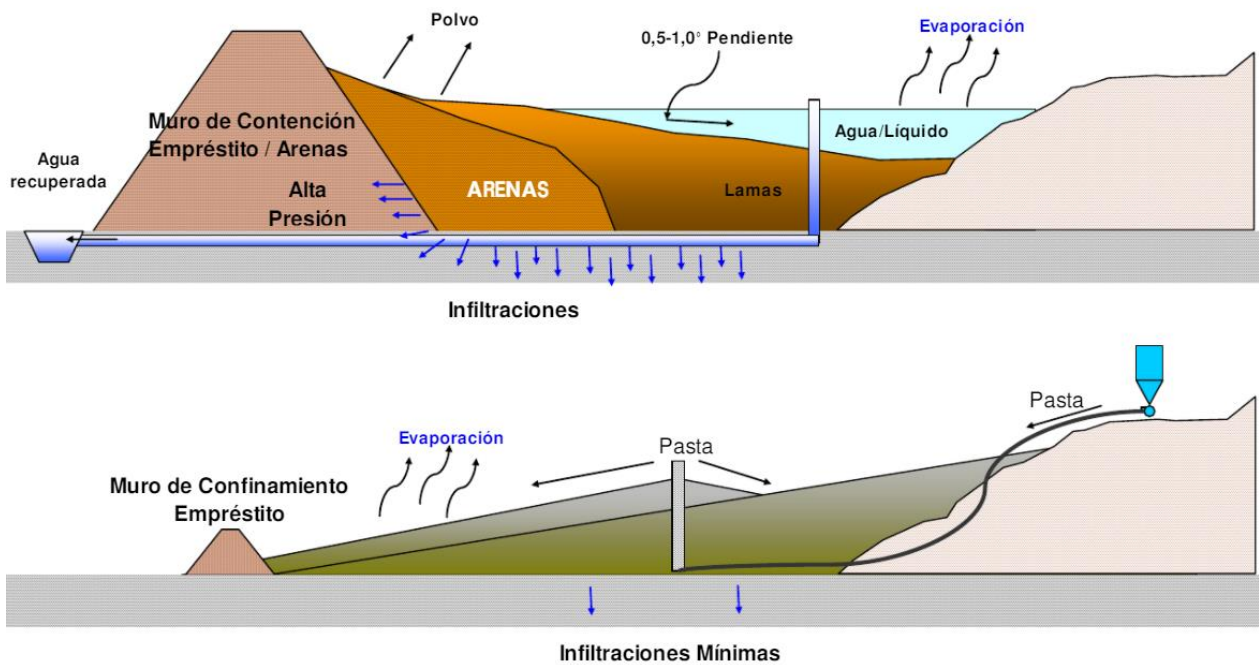


Figura 2-2: Comparación entre depósitos de relaves convencionales (arriba) y espesados (abajo)
 Extraído de “Depósitos de Relaves Espesados y en Pasta, VST Ingenieros, SUSTENTARE, 2007.

La principal característica que los diferencia de los depósitos convencionales (Meggyes & Debreczeni, 2006) es que en un sistema tradicional, las propiedades del depósito están controladas por la planta de procesos y los diques confinantes, y todas las ‘estructuras de control’ deben ser diseñadas para soportar las cargas impuestas sobre ellas por el depósito. Con un sistema de depositación espesado, en tanto, las propiedades del depósito de relaves son ‘diseñadas’ para acomodarse a la topografía del terreno, haciéndolo más seguro y amigable con el medioambiente.

Para generar depósitos espesados, se debe remover gran parte del agua de procesos. Esto se logra pasando el material a través de espesadores de alta densidad (grandes tanques circulares), en los cuales las partículas se asientan en el fondo para luego ser extraídas como un flujo en profundidad y liberadas en el área de depósito. Esto debe dar como resultado una pasta homogénea y no-segregable pero aún bombeable.

Debido a su consistencia espesa y alta viscosidad, esta pasta puede fluir grandes distancias sin segregarse y generar pendientes de 2-6% sin estructuras de contención (Meggyes & Debreczeni, 2006), aunque el éxito con pendientes mayores a 3% ha sido limitado (Watson, 2010). Ya que pueden ser depositados en grandes superficies, se aumenta el área de exposición y por tanto aumenta la tasa de evaporación, generando depósitos aún más secos y estables. Se elimina, además, la tradicional laguna de decantación en su superficie, reduciendo la infiltración de aguas de precipitación y aguas de proceso.

Otras de sus ventajas son una mayor vida útil del depósito, un menor volumen de depósito, una mayor recuperación de aguas de proceso, la reducción de la polución por polvo, la eliminación del riesgo de derrame de relaves (debido a una mayor estabilidad sísmica), la inhibición del drenaje ácido, un plan de cierre más sencillo y económico, y su potencial uso como material de fundación.

Dentro de sus desventajas se encuentran el costo adicional en que se debe incurrir para poner en operación una planta de espesamiento, así como la compleja infraestructura que se le asocia. Además, si se requiere almacenar aguas de proceso, se deben tomar medidas adicionales.

2.2.2 Caracterización geotécnica

Un reconocimiento y/o estudio geotécnico del relave consiste en una serie de técnicas tanto *in situ* como en laboratorio que permiten obtener datos sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material. Luego, estos datos pueden ser usados en modelos matemáticos que permitan estudiar el comportamiento del depósito cuando es sometido a una carga externa (resistencia, deformaciones que experimenta, distribución interna de tensiones, etc.), los esfuerzos que ejerce sobre una estructura (muros de contención, pantallas, túneles, etc.) y analizar su estabilidad en talud.

A continuación, se definen los parámetros de mayor relevancia a la hora de caracterizar un relave espesado, así como una breve descripción de los métodos comúnmente utilizados para su medición. Cabe destacar que por tratarse de un material en estado semilíquido o semiplástico, no todos los métodos normalmente aplicados en suelos pueden ser usados.

2.2.2.1 Distribución de tamaño de partículas

El objetivo de un análisis de tamaño de partículas o análisis granulométrico es determinar la proporción que cada tamaño de partícula ocupa en la totalidad del contenido sólido del material, mediante su separación en distintos rangos de tamaño.

Un depósito sólido está compuesto de unidades discretas. Para determinar cuantitativamente el tamaño de dichas unidades, los sólidos deben ser separados mediante procesos mecánicos y, en los casos en que existan agentes cementantes, químicos. El análisis granulométrico total de un sólido involucra dos procesos principales: la *dispersión*, separación física o química del medio en sus unidades discretas mediante la remoción de agentes cementantes; y el *fraccionamiento*, la clasificación o separación de partículas en diferentes grupos de acuerdo a su tamaño (Tindall & Kunkel, 1999).

Una dispersión incompleta resultará en agregados de pequeñas partículas que pueden ser erróneamente considerados como partículas de tamaño mayor, lo cual irá en detrimento de un correcto análisis.

El fraccionamiento de las partículas de diámetro mayor a 0,025 mm se consigue mediante un tamizado del material por mallas estandarizadas según norma ASTM, procedimiento que puede ser hecho a mano o en un agitador mecánico. La Tabla 2-1 muestra los distintos números de malla y su correspondiente apertura, indicando el máximo diámetro de partículas que pasa a través de ellas.

Tabla 2-1: Especificación de mallas según norma ASTM (11-70).

# de Malla	Apertura [mm]	# de Malla	Apertura [mm]
5	4	50	0,3
6	3,35	60	0,25
7	2,8	70	0,212
8	2,36	80	0,18
10	2	100	0,15
12	1,7	120	0,125
14	1,4	140	0,106
16	1,18	170	0,09
18	1	200	0,075
20	0,85	230	0,063
25	0,71	270	0,053
30	0,6	325	0,045
35	0,5	400	0,037
40	0,425	500	0,025
45	0,355		

Para tamaños de partícula menor se utiliza la *hidrometría o sedimentación*, basada en los principios de la Ley de Stokes, según la cual la resistencia ofrecida por un líquido de cierta densidad a la caída de una partícula esférica (velocidad terminal) es proporcional al cuadrado de su radio. El procedimiento puede ser llevado a cabo en una pipeta o hidrómetro, y consiste en suspender las partículas más finas en una muestra de agua a una temperatura determinada, agitar la muestra y medir el tiempo que las partículas tardan en depositarse. En ese punto, todas las partículas de diámetro mayor al correspondiente a ese intervalo de tiempo se habrán depositado. Mediante la selección de intervalos de tiempo correspondientes a tamaños de partícula cada vez menores, es posible determinar la granulometría por diferencia.

2.2.2.2 Densidad de partículas

También llamada densidad de partículas media, consiste en la densidad de los granos que componen el medio poroso, y se define como la razón de masa de sólidos por unidad de volumen sólido:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde ρ_s = densidad de partículas (kg m^{-3}); M_s = masa de sólidos (kg); y V_s = volumen de sólidos (m^3).

El método más común para la medición de este parámetro es el uso de un *picnómetro*. La masa de sólidos se obtiene pesando la muestra; el volumen se determina midiendo la cantidad y densidad de agua desplazada dentro del aparato. Como las partículas de un sólido pueden tener distintas densidades, el resultado obtenido gracias al picnómetro es un promedio ponderado.

2.2.2.3 Índice de vacíos

El índice de vacíos, e , se define como la razón entre el volumen de vacíos o poros y el volumen de sólidos, y se expresa como:

$$e = \frac{(V_a + V_w)}{V_s}$$

Donde V_a = volumen de gas, y V_w = volumen de líquido.

2.2.2.4 Porosidad

La *porosidad total* corresponde a la fracción del volumen total ocupada por espacios vacíos o poros, y se expresa como:

$$\phi_t = \frac{(V_a + V_w)}{V_t} = \frac{e}{(1 + e)}$$

Donde V_t = volumen total.

La porosidad del medio depende de una serie de factores, incluyendo la distribución de tamaño de las partículas, su forma, empaquetamiento, cementación, consolidación y compactación (la cual a su vez varía con la profundidad).

La *porosidad efectiva*, en tanto, corresponde al porcentaje de poros interconectados que permiten la circulación de fluidos. Es decir, dependerá no sólo de la existencia de poros, sino también de la conexión entre ellos. Así, la porosidad efectiva de un medio será menor a la total en caso de tener parte de sus poros

aislados. Las estructuras presentes en el medio representan zonas de alta conductividad de poros, por lo que aumentarán la porosidad efectiva.

2.2.2.5 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad del material para transmitir fluidos, generalmente agua. Se define como una constante de proporcionalidad ligada a la permeabilidad intrínseca del medio poroso y al gradiente hidráulico, de acuerdo a la siguiente relación:

$$K = -\frac{v}{i}$$

Donde v es la permeabilidad intrínseca e i es el gradiente hidráulico.

2.3 Modelación Numérica

2.3.1 Generalidades

Un modelo es una representación aproximada y simplificada de la realidad. En el área de la hidrogeología, en particular, la modelación ha permitido la resolución de una amplia gama de problemas, dada la usual escasez de información y la alta complejidad del comportamiento de las aguas subterráneas.

Dicha complejidad dependerá de los fenómenos que se quieran representar y del grado de precisión deseada. Es por esto que la eficiencia de un modelo dependerá en gran medida de los objetivos y alcances que tenga el estudio, los cuales determinarán la metodología y enfoque más apropiados.

Los modelos pueden ser conceptuales, físicos, análogos o matemáticos (analíticos o numéricos). Los modelos conceptuales buscan identificar las características más importantes de un sistema, sin cuantificarlas; los modelos físicos son una representación a menor escala del sistema (por ejemplo, sistemas de fallas en arcilla); los modelos análogos emulan sistemas y los modelos analíticos/numéricos permiten cuantificar los fenómenos estudiados mediante formulaciones matemáticas.

Los modelos numéricos permiten la resolución de cualquiera de las ecuaciones que describen los procesos físicos controladores del movimiento y composición de las aguas subterráneas. Sin embargo, se encuentran condicionados por la capacidad de cálculo y sus soluciones no serán exactas, sino una aproximación de la realidad.

La aplicabilidad de los modelos numéricos estará sujeta al cumplimiento de los supuestos adoptados en las formulaciones matemáticas, como es el caso de la Ley de Darcy, la cual generalmente se cumple para medios porosos (dadas las bajas velocidades que suele tener el flujo de agua subterránea), pero sus principios gobernantes dejan de ser válidos para medios fracturados. Para enfrentar estas dificultades, se suelen utilizar modelos convencionales incluyendo ajustes de los parámetros hidráulicos.

2.3.2 Tipos de modelos

Existen muchas maneras de clasificar los modelos numéricos. A continuación, se presentan las características más generales que los distinguen.

2.3.2.1 Dimensionalidad

Los modelos unidimensionales (1D) asumen que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Este puede ser el caso de un flujo vertical controlado únicamente por la gravedad y en donde no existen

heterogeneidades relevantes en otras direcciones, o el flujo longitudinal por el canal de un río asumiendo que éste es siempre perpendicular a las secciones transversales (para determinar el nivel de agua en el diseño de un dique, por ejemplo).

Los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones de velocidad y flujo en un plano, el cual puede ser una sección transversal (estudiar secciones de un rajo que presenta estructuras de flujo preferente para analizar estabilidad del talud) o una vista en planta (representar flujos muy extendidos y con una variación vertical de la velocidad pequeña, como en el caso de lagos, estuarios, etc.).

Los modelos tridimensionales (3D) constituyen el estado más avanzado de la modelación. Reproducen el comportamiento del agua subterránea en cualquier dirección, y por tanto son aplicables a cualquier caso práctico. Permiten, además, el análisis en 2D mediante vistas de secciones transversales o en planta.

2.3.2.2 Método de cálculo

A modo general, existen tres metodologías para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales parciales: los métodos de *diferencias finitas*, *elementos finitos* y *volúmenes finitos*. De estos, los dos primeros son los que en la práctica más se aplican a problemas de aguas subterráneas, y se explican brevemente a continuación:

- **Método de diferencias finitas:** En este método las derivadas parciales son aproximadas por cocientes incrementales. Su simplicidad, sin embargo, requiere el uso de un dominio rectangular, con una grilla no necesariamente equiespaciada. En esta grilla, se le asigna un valor conocido a ciertos nodos, los cuales constituyen las condiciones iniciales o de borde. En la Figura 2-3, la dirección x representa la coordenada espacial de flujo y la dirección y representa el tiempo. Para obtener el valor del nodo (i, j) se debe conocer la solución en sus nodos vecinos.

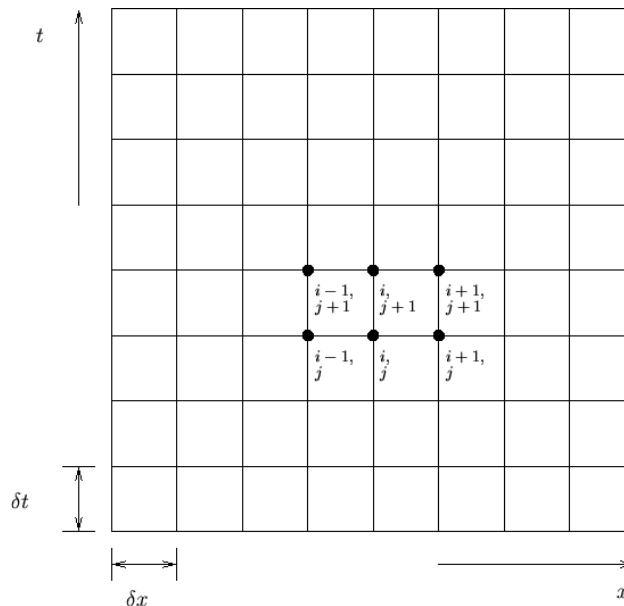


Figura 2-3: Esquema del método de diferencias finitas (Mohelis, J. M., 2001)

- **Método de elementos finitos:** En este caso, el dominio es dividido en subdominios disjuntos o *elementos*, en cuyos vértices se definen los nodos sobre los cuales se llevan a cabo los cálculos.

Los elementos pueden tener prácticamente cualquier geometría, aunque por simplicidad suele emplearse una malla triangular. Esto permite representar de mejor forma dominios complejos y refinar la malla en zonas de mayor interés (Figura 2-4). La formulación matemática es compleja y se deriva del método de Ritz (1909), donde las ecuaciones diferenciales se reformulan en un problema variacional equivalente, asignándole a cada nodo una función base cuya solución estará dada por una combinación lineal de éstas, las cuales deben ser continuas dentro del dominio y contorno de cada elemento con el fin de garantizar convergencia a la solución exacta.

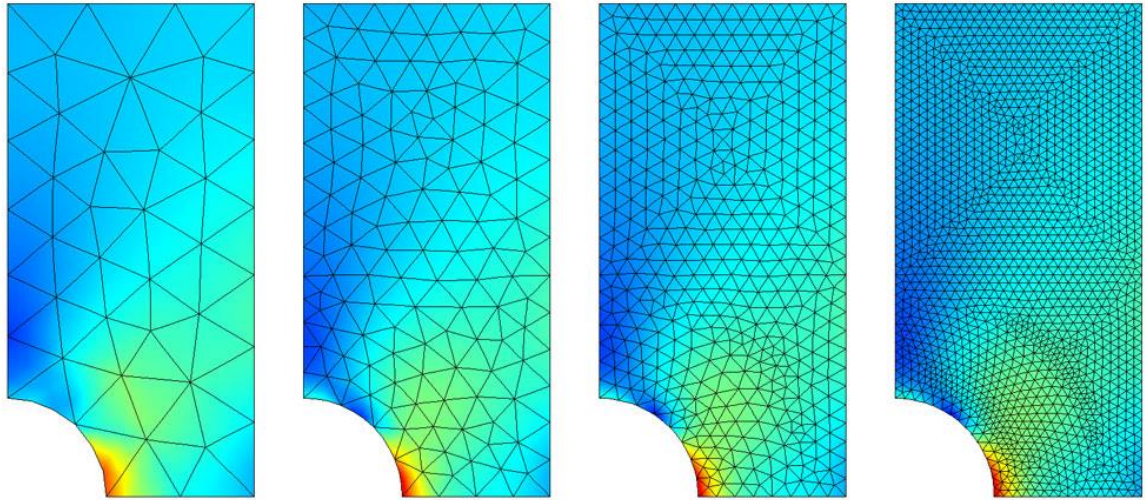


Figura 2-4: Esquema del método de elementos finitos para distintas discretizaciones (“Finite Element Mesh Refinement”, www.comsol.com)

2.3.2.3 Variación en el tiempo

Existen dos tipos de modelos numéricos en cuanto al comportamiento de sus variables de estado en el tiempo.

En un modelo en **estado estacionario**, estas variables permanecen invariantes. En el caso de modelación hidráulica, esto quiere decir que la dirección y magnitud del flujo son constantes en el tiempo. De manera opuesta, en un modelo **transiente** la dirección y magnitud del flujo varían en el tiempo.

Esto no quiere decir que en el estado estacionario no exista un movimiento de agua, sino que el total de agua dentro del dominio permanece constante; la cantidad de agua que entra al sistema es la misma que sale. Esto simplifica significativamente la ecuación de flujo, ya que el tiempo deja de ser una variable independiente y por lo tanto el término ‘almacenamiento’ se elimina de los cálculos.

La ecuación simplificada que describe un flujo transiente es:

$$\frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t}$$

Mientras que, para un flujo en estado estacionario, al no existir variación en el tiempo, esta ecuación pasa a ser:

$$\frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial z} = 0$$

Donde ρ_w es la densidad del agua, q_w es el flujo de agua de Darcy, ϕ es la porosidad y S_w es la saturación.

2.3.3 Selección de código/software

El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en su “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA”, 2012, entrega recomendaciones a la hora de escoger una plataforma o *software* para construir un modelo de flujo de aguas subterráneas, de acuerdo con las capacidades de cada uno y los resultados que desean obtenerse. Se recomienda una lista de *software* (no exhaustiva) en relación al medio y al tipo de flujo, se resume en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Resumen de software recomendados por el SEA para a modelación de flujo de aguas subterráneas

Tipo de modelo	Software	Observaciones
Flujo en medio saturado	GMS	Los <i>software</i> recomendados sustentan el código MODFLOW (diferencias finitas), el cual permite una representación adecuada de los procesos que se dan en estas condiciones de flujo y ha sido ampliamente utilizado tanto a nivel mundial como en Chile.
	Groundwater Vistas	
	Modelmuse	
	Visual Modflow	
Flujo en medio no saturado	Feflow	La disponibilidad de <i>software</i> para modelación de flujo en medio no saturado es menor. Estos en general son capaces de simular la zona del acuífero no saturada y saturada de manera conjunta.
	GMS (Femwater)	
	Hydrus 1D	
	VS2DI	
Flujo con densidad variable	Feflow	Los <i>software</i> diseñados para flujos con densidad variable fueron en su mayoría pensados para modelar acuíferos costeros. En general, la modelación de cambios muy bruscos de densidad (e.g. los salares del norte de Chile) es compleja, y se pueden presentar problemas de estabilidad numérica y convergencia, además de tiempos de simulación extensos debido al desarrollo de modelos multicapas.
	GMS (Femwater)	
	Seawat	
	Sutra	
Flujo en acuíferos fracturados y medios kársticos	Feflow	Los acuíferos fracturados son frecuentes en el país, particularmente en zonas precordilleranas. Son complejos de modelar, ya que se requiere un conocimiento profundo del acuífero y sus anisotropías, por lo cual suelen representarse como medios porosos, que en la medida en que el dominio sea lo suficientemente grande es una aproximación razonable. Si lo anterior no es aplicable, se pueden asumir tuberías discretas incorporadas en un flujo difuso, zonas de bajo almacenamiento y alta permeabilidad o un enfoque dual de conductividades.
	GMS	
	Groundwater Vistas	
	Visual Modflow	

3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Depósito de Relaves estudiado se ubica en la región de Antofagasta, Chile, a 180 kilómetros de la ciudad de Antofagasta y a 100 kilómetros de Calama. La altitud en la zona se encuentra en torno a los 2.300 msnm. El poblado más cercano corresponde a la localidad de Sierra Gorda, la cual se encuentra a unos 30 kilómetros aprox. Se emplaza en una importante zona minera con depósitos de sulfuros y óxidos.

3.1 Marco geológico

A continuación, se detallan las unidades geológicas presentes en el sector donde se encuentra ubicado el Depósito de Relaves (ver Figura 3-1). La descripción fue elaborada Mpodozis et al. (2011) a escala 1:25.000.

Cuaternario (Pleistoceno – Holoceno)

Depósitos aluviales activos (Qa)

Bloques, gravas, arenas en cauces actuales y llanuras de inundación.

Depósitos coluviales (Qc)

Bloques y gravas con matriz de arena, no consolidados, localmente forman conos coalescentes mayores en laderas de cerros altos.

Mioceno Superior – Plioceno

Depósitos aluviales antiguos (MsPla)

Gravas, arenas y limos, no consolidados, generalmente pobremente estratificados en conos aluviales y llanuras de inundación antiguas. Localmente, desarrollo menor de paleosuelos de yeso.

Mioceno Inferior – Mioceno Medio

Depósitos de gravas aluviales y fluviales antiguas (Mimg)

Conglomerados finos y gruesos, matriz soportados, intercalaciones de arenas, medianamente consolidados, color gris claro amarillento.

Oligoceno – Mioceno Inferior

Depósitos de gravas polimícticas fluviales y brechas sedimentarias finas clastosoportadas (OMica)

Gravas no consolidados y levemente cementados, con intercalaciones de niveles arenosos y limolíticos rojos.

Eoceno Superior – Oligoceno

Estratos de Cerro Ceniciento (EOcc)

Conglomerados polimícticos fluviales, bien estratificados, clastosoportados, matriz arenosa, compactados y moderadamente litificados con cemento calcáreo (Ex miembro superior conglomerádico de los Estratos de Cerro Casado).

Estratos de Esperanza (Ese)

Depósitos de flujos piroclásticos riolíticos y dacíticos semiconsolidados y niveles cineríticos. Consiste en tobas de cristales y lapilli generalmente alteradas a laumonita o calcita (Ex miembro inferior piroclástico de Estratos de Cerro Casado).

Paleoceno Inferior

Domos y pórfidos dacíticos y riódacíticos de sanidina, biotita y piroxeno (Pipda)

Conjunto de cuerpos subvolcánicos y domos extrusivos de color violáceo rosado. Afloran en varios sectores como “cluster” de cuellos subvolcánicos porfídicos o complejos de domos y brechas asociadas. Se asocian a zonas de alteración argílica avanzada y silicificación con algunas estructuras. Pertenece al Complejo de Domos del Paleoceno Inferior.

Cretácico Superior alto

Lavas andesíticas y basálticas (Ksqm3(g))

Pertenece a la unidad superior de la Formación Quebrada Mala (Campaniano – Maastrichtiano). La unidad superior reconocida en la Fm. Quebrada Mala, sobre las tobas dacíticas (f), corresponde a un grueso paquete de lavas amigdaloidales, de composición andesítica a basáltica.

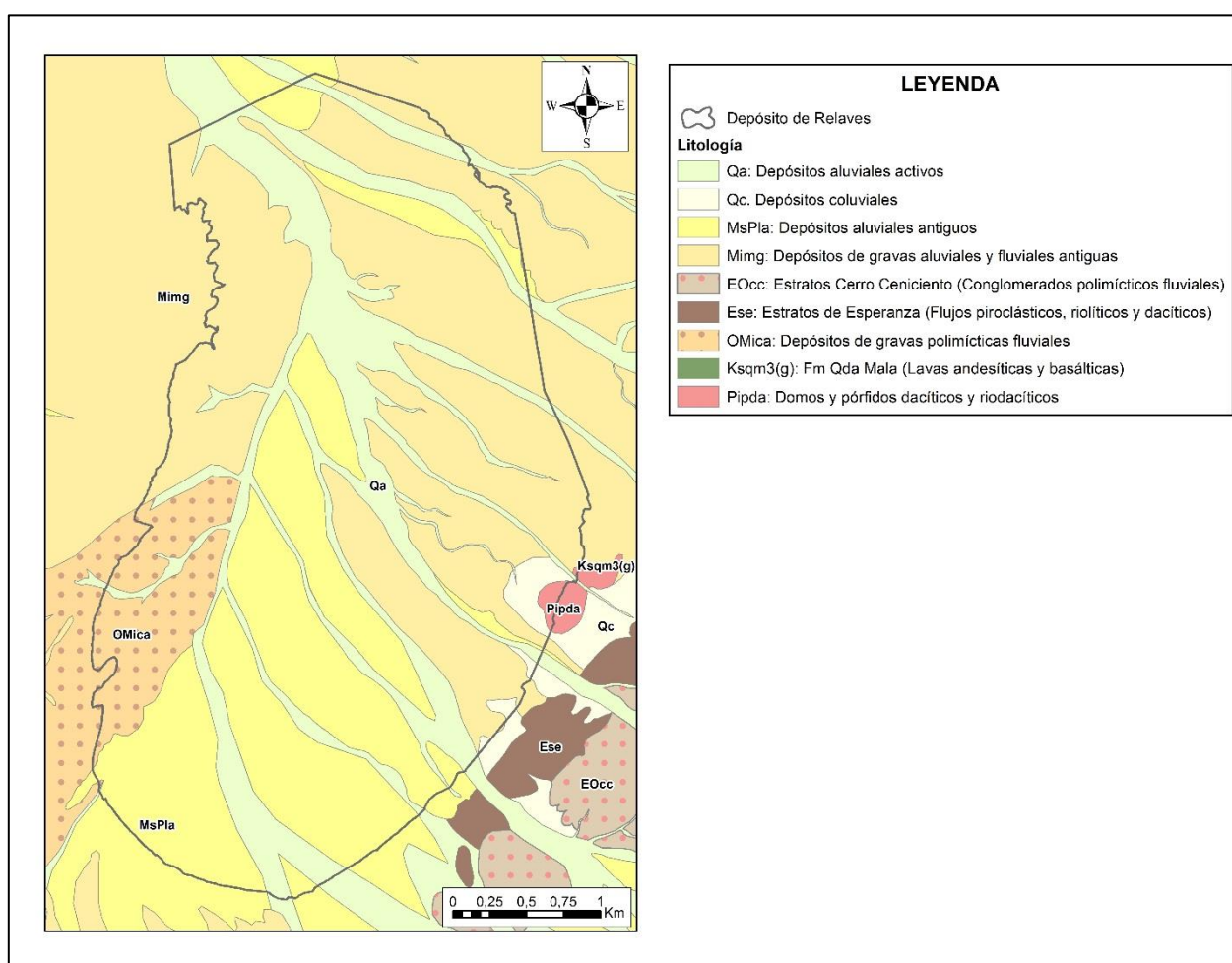


Figura 3-1: Litologías observadas en el sector donde se emplaza el Depósito de Relaves

3.2 Marco hidrológico

El Depósito de Relaves se ubica en una subcuenca que abarca una superficie de 253 km². A modo general, el drenaje sigue una dirección este-oeste hasta alcanzar un alto topográfico en el extremo occidental del Depósito de Relaves, el cual se encuentra emplazado sobre una quebrada que desvía las aguas en dirección sur-norte.

La zona se caracteriza por escasas a nulas precipitaciones, con altas tasas de evaporación. Debido a esto, en el sector del Depósito de Relaves se considera que las precipitaciones no influyen significativamente en el balance hídrico.

Por otro lado, los rasgos geológicos son de relevancia al momento de estudiar la disposición del depósito y evaluar la potencial infiltración generada por esta obra de acumulación.

3.3 Marco hidrogeológico

En la zona se han definido tres unidades hidrogeológicas principales (UH), ilustradas en la Figura 3-2 y descritas a continuación.

UH-1: Unidad de alta importancia hidrogeológica

Constituida por depósitos sedimentarios no-consolidados o semi-consolidados del Mioceno Superior-Holoceno que presentan las permeabilidades más altas de la zona.

UH-2: Unidad de media importancia hidrogeológica

Esta unidad incluye principalmente rocas sedimentarias continentales con un grado mayor de consolidación, constituidas por gravas antiguas (Mioceno Inferior) que se han visto afectadas por procesos tectónicos. Debido a su mayor consolidación se observan permeabilidades menores que en la UH-1, aunque debido a la influencia tectónica, podrían presentarse estratos con una mayor permeabilidad secundaria en profundidad.

UH-3: Unidad de muy baja importancia hidrogeológica

Aquí se incluyen todas las rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias antiguas que no pertenecen a las otras unidades hidrogeológicas. En general esta unidad tiene permeabilidades significativamente más bajas a nulas.

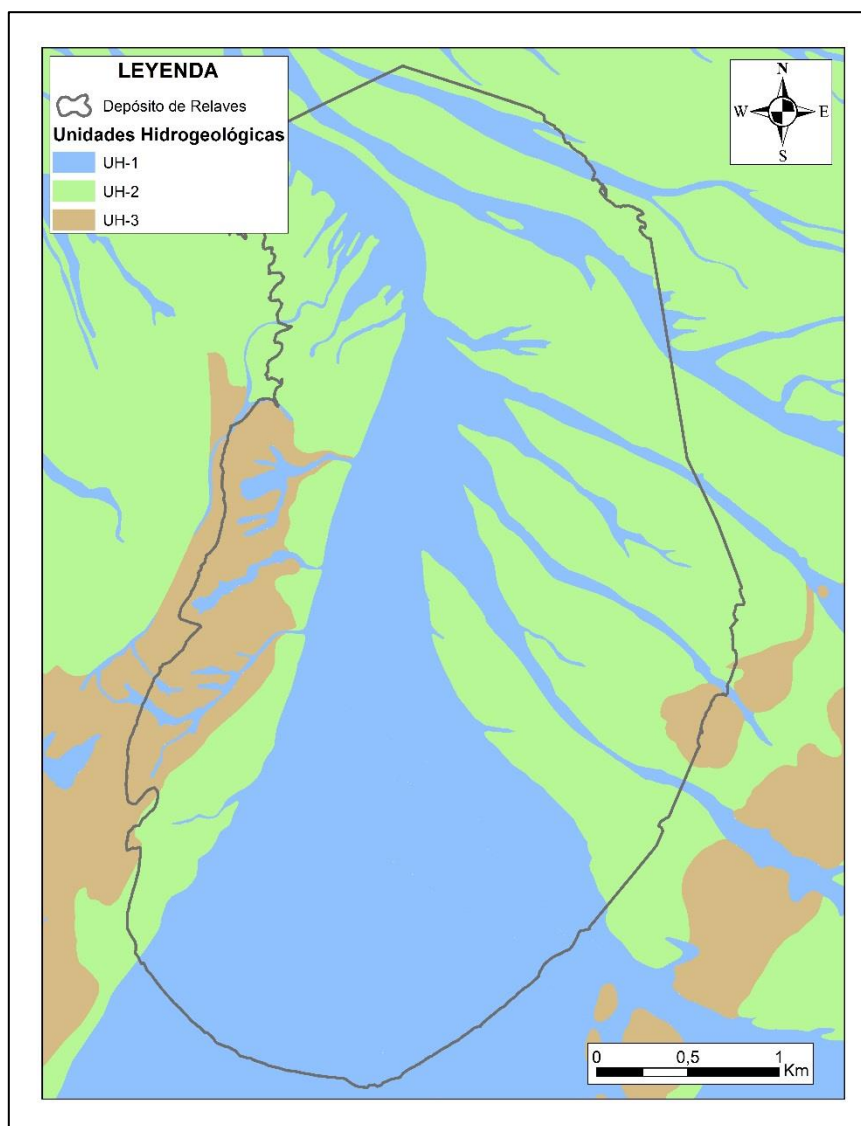


Figura 3-2: Distribución de unidades hidrogeológicas en el sector del Depósito de Relaves

Estudios hidrogeológicos previos en la zona incluyeron sondajes de gran profundidad (200 metros) en los cuales no se observó ocurrencia de agua, estableciendo un mínimo de profundidad para el nivel freático, el cual, dadas las condiciones hidrológicas estables de la zona, no debiese presentar variaciones estacionales significativas.

En el sector se ha observado un grado de consolidación incremental a mayor profundidad, dado el aumento de carga litostática. Esto genera, a su vez, una menor permeabilidad a mayor profundidad, así como un menor almacenamiento.

La excepción serían niveles específicos que presenten un mayor grado de fracturamiento, relacionados a procesos tectónicos anteriores a edades miocenas. En estos casos, el agua se encontraría contenida en acuíferos aislados que no serían explotables debido a su lento movimiento y nula recarga.

4 TRABAJOS DE TERRENO

Los trabajos descritos a continuación forman parte de la campaña de terreno desarrollada entre septiembre de 2015 y enero de 2016, donde la empresa SRK participó ejecutando o supervisando dichas labores.

4.1 Geofísica

Exploraciones geofísicas previas fueron realizadas durante el año 2012, con el objetivo de estudiar la propagación de humedad hacia el suelo subyacente al depósito de relaves. Sin embargo, desde ese estudio hasta la fecha el depósito ha debido ser modificado, a modo de prevención ante el contenido de sólidos menor al de diseño. Dentro de estas modificaciones se encuentra la construcción de muros internos de contención, previa aprobación de las autoridades competentes.

Debido a estos cambios en la configuración del depósito, se hizo necesaria una nueva exploración geofísica, llevada a cabo en septiembre de 2015. Esta consistió en el trazado de cuatro perfiles tomográficos y diez sondajes NanoTEM, los cuales mediante el contraste de resistividades permitirán determinar el alcance de la migración de humedad hacia el suelo natural.

A continuación, se describe la metodología utilizada durante esta campaña de exploración.

4.1.1 NanoTEM

Para las mediciones de NanoTEM se utilizó la metodología de loop central con dos configuraciones. La primera consistió en un loop transmisor cuadrado de 50 x 50 metros y un receptor de 10 x 10 metros, con una profundidad estimada de investigación de 70 metros aproximadamente. La segunda, en tanto, incluyó un loop transmisor cuadrado de 20 x 20 metros y un receptor de 5 x 5 metros, investigando una profundidad de 40 metros aproximadamente.

Se buscó que las 10 estaciones instaladas replicaran en parte el estudio anterior para establecer comparaciones, sin embargo, en algunos sectores esto no fue posible debido a cambios en las condiciones del depósito y accesos. En la Tabla 4-1 se detallan las coordenadas de los 10 puntos de medición, cuya distribución se muestra en la Figura 4-1.

Tabla 4-1: Ubicación de puntos NanoTEM

NanoTEM	Coordenadas Mina		
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
NT-1	86698,3	455976,9	2200,6
NT-2	88164,8	455861,4	2220,3
NT-3	87365,6	457095,4	2197,5
NT-4	86856,6	457695,2	2170,9
NT-5	86296,9	456681,1	2196,2
NT-6	87219,5	458895,2	2150,9
NT-7	88255,1	459037,5	2149,0
NT-8	88526,4	456918,6	2209,8
NT-9	87896,0	459466,0	2147,0
NT-10	87516,9	460369,5	2124,1

4.1.2 Tomografía Eléctrica

Para los perfiles de tomografía eléctrica, se implementaron cuatro líneas de más de 50 electrodos separados por 5 metros, generando perfiles de al menos 250 metros de largo y una profundidad de exploración estimada de 50 metros. Para el perfil de mayor longitud se realizó un traslape entre tendidos.

El resultado fueron cuatro perfiles, que en total suman 1.215 metros de longitud. La Tabla 4-2 detalla su ubicación y longitud, y la Figura 4-1 muestra su ubicación dentro del depósito.

Tabla 4-2: Coordenadas del inicio y fin de cada perfil tomográfico

Perfil Tomográfico	N° Electrodo	Longitud (m)	Coordenadas Mina (m)			
			Inicio		Fin	
			Este	Norte	Este	Norte
TE1	84	415	87166,8	460217,6	87537,8	460402,9
TE2	51	250	87396,3	460308,0	87619,8	460420,9
TE3	56	275	87823,1	459442,9	88072,1	459560,4
TE4	56	275	86612,3	457671,1	86886,3	457698,2

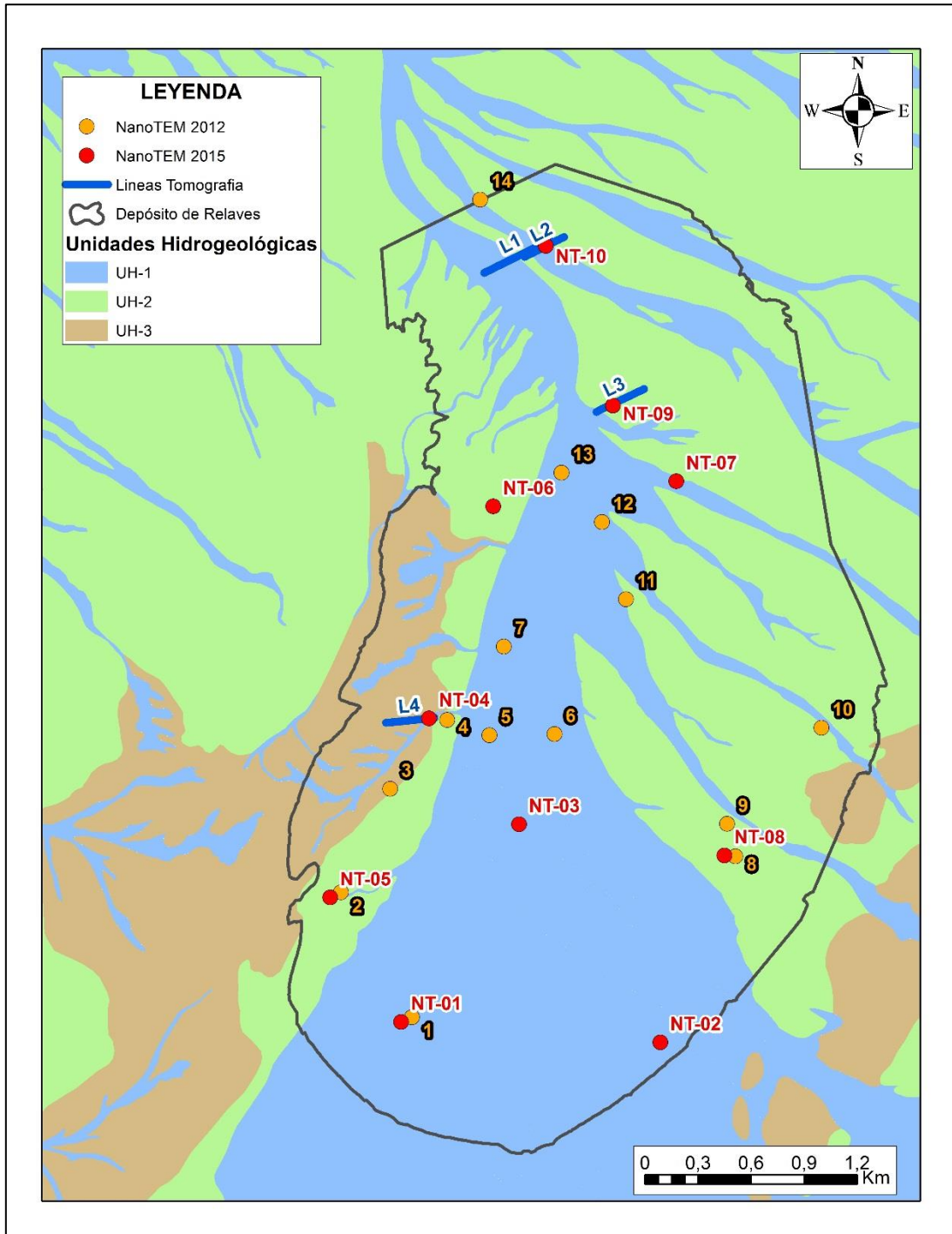


Figura 4-1: Distribución de puntos NanoTEM y Perfiles Tomográficos dentro del depósito

4.2 Calicatas

Con la finalidad de estudiar el material más superficial del depósito, la campaña de septiembre del 2015 incluyó la excavación de cinco calicatas, ubicadas en puntos de interés dentro del depósito de relaves. Estas fueron construidas por máquinas excavadoras, las cuales alcanzaron una profundidad de hasta 3.5

metros. La Tabla 4-3 detalla la ubicación y profundidad de cada excavación, y la Figura 4-2 muestra la ubicación de estas dentro del depósito de relaves.

Tabla 4-3: Coordenadas y profundidad de calicatas

Calicata	Coordenadas Mina			Profundidad (m)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
CC-1	87759	460398	2120	3,2
CC-2	88214	459616	2135	3,2
CC-3	86841	457703	2164	2,8
CC-4	88254	457156	2189	2,6
CC-5	86712	456121	2194	2,9

El trabajo en cada calicata incluyó las actividades in-situ de descripción de materiales observados y ensayos de densidad por método de cono de arena, realizados a distintas profundidades en función de las condiciones de las paredes y fondo de cada calicata.

A su vez, se tomaron muestras en cada una de ellas, las cuales fueron enviadas a laboratorio para contar con una caracterización geotécnica detallada. Estas muestras fueron dispuestas en bolsas plásticas dobles selladas, con la finalidad de mantener la condición de contenido de humedad en terreno.

La Tabla 4-4 resume el tipo y cantidad de ensayos in-situ y de laboratorio realizados en cada calicata. Las muestras para SWCC (*soil-water characteristic curve*) fueron enviadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile a través de IDIEM, mientras que el resto de las muestras fueron estudiadas por el laboratorio de *One Geotecnia*.

Tabla 4-4: Resumen de muestras (S: seca, H: húmeda) y ensayos realizados

Calicatas	In-Situ	Laboratorio				
	Densidad	Clasificación	Humedad	Permeabilidad	Hidrometro	SWCC
CC-1	1	1	2	0	0	0
CC-2	1	1	1	0	0	0
CC-3	1	1	1	0	0	0
CC-4	1	1	1	1	1	1
CC-5	1	1	1	1	1	1
Total	5	5	6	2	2	2

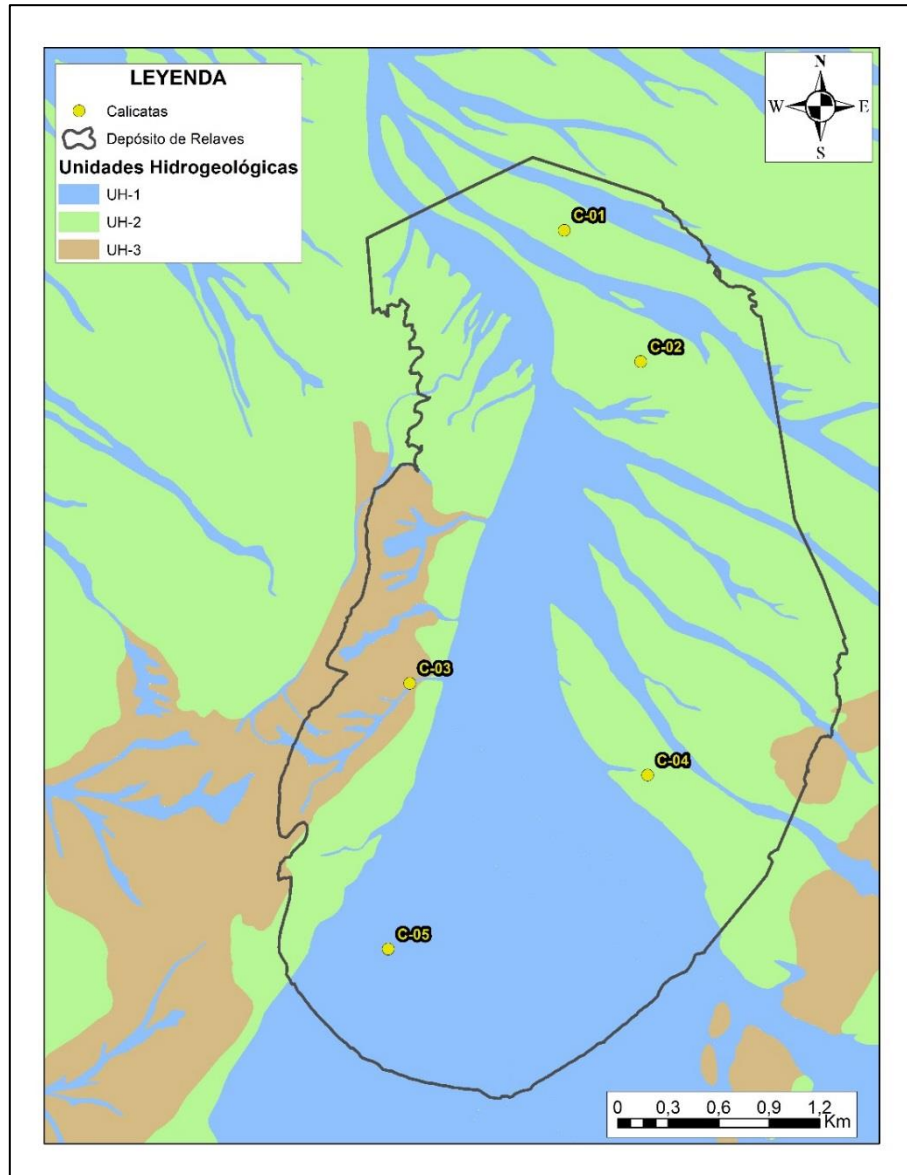


Figura 4-2: Ubicación de puntos de excavación de calicatas

4.3 Sondajes

La etapa final de la campaña de terreno consistió en la perforación de siete sondajes de exploración, con el objetivo de definir perfiles estratigráficos en zonas de interés del depósito de relaves. Así mismo, se buscaba determinar el contenido de humedad tanto en el relave como en el suelo natural, mediante un muestreo a distintas profundidades. Estas muestras, además, permitirían la caracterización geotécnica del relave y del suelo mediante análisis de laboratorio.

Ya que uno de los parámetros de mayor relevancia tanto para la caracterización geotécnica como para el modelo numérico es el contenido de humedad, se decidió realizar estas perforaciones mediante el sistema sónico, el cual mantiene inalteradas las muestras en este aspecto.

Las perforaciones tuvieron un diámetro de 4 ¾” y el casing un diámetro de 6”. La Tabla 4-5 detalla las coordenadas y la profundidad perforada para cada sondaje, que en conjunto totalizaron 206 metros. La Figura 4-3 muestra su distribución dentro del depósito de relaves.

Tabla 4-5: Coordenadas y profundidad de sondajes

Nombre Sondaje	Coordenadas Mina			Profundidad (m)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
S1	87380	460240	2124	42,5
S2	87529	460338	2124	28
S3	87905	459459	2147	29
S4	88015	459525	2147	20
S5	86781	457688	2171	29
S6	86698	455977	2201	29
S7	86542	456661	2196	29

La determinación de la profundidad final a perforar en cada punto se realizó en terreno, buscando alcanzar el punto en que el contenido de humedad del suelo correspondiese al original o natural, es decir hasta donde la humedad proveniente del relave estaba afectando al suelo subyacente.

La distribución de los sondajes dentro del depósito de relaves se basó en los antecedentes existentes, con el objetivo de obtener perfiles estratigráficos y de humedad que caracterizaran al depósito en su totalidad. Los antecedentes de mayor peso a la hora de determinar las coordenadas de perforación fueron la geofísica realizada y la existencia de sectores más propensos a generar infiltración. Los sondajes S1 y S7 se encuentran en la quebrada principal bajo el depósito, que corresponde a una posible vía preferente de drenaje y migración de humedad aportada por el depósito de relaves.

Los trabajos realizados en cada perforación fueron:

- Descripción litológica y confección de un perfil estratigráfico in-situ, así como la determinación del contenido de humedad cualitativo.
- Ensayos in-situ de penetración estándar o SPT (Standard Penetration Test).
- Muestreo mediante el sistema Lexan Liner, para obtener muestras inalteradas que permitan analizar la densidad original.
- Muestreo del testigo cada 1.5-2 metros, embaladas y almacenadas debidamente para análisis de granulometría, humedad y plasticidad.
- Una vez finalizada cada perforación, se realizaron ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.

La Tabla 4-6 resume la cantidad y tipos de ensayos in-situ y de laboratorio realizados en cada sondaje. Todos los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de IDIEM.

Tabla 4-6: Resumen de ensayos realizados en cada sondaje

Sondaje	In-Situ		Laboratorio			
	SPT	Lefranc	Clasificación	Humedad	Permeabilidad	Hidrómetro
S1	1	1	6	23	2	2
S2	1	1	4	13	0	0
S3	3	1	5	17	2	2
S4	3	1	3	12	0	0
S5	3	1	4	13	2	2
S6	2	1	5	10	0	0
S7	3	1	4	13	2	2
Total	16	7	31	101	8	8

Los ensayos de laboratorio realizados corresponden a clasificación completa (granulometría, límites de Atterberg y gravedad específica de partículas sólidas) y determinación de humedad y permeabilidad, con los cuales se podrá calcular de manera indirecta los parámetros de la curva de retención de humedad o SWCC (Soil Water Characteristic Curve) de los materiales, elemento fundamental para la modelación de flujos no saturados.

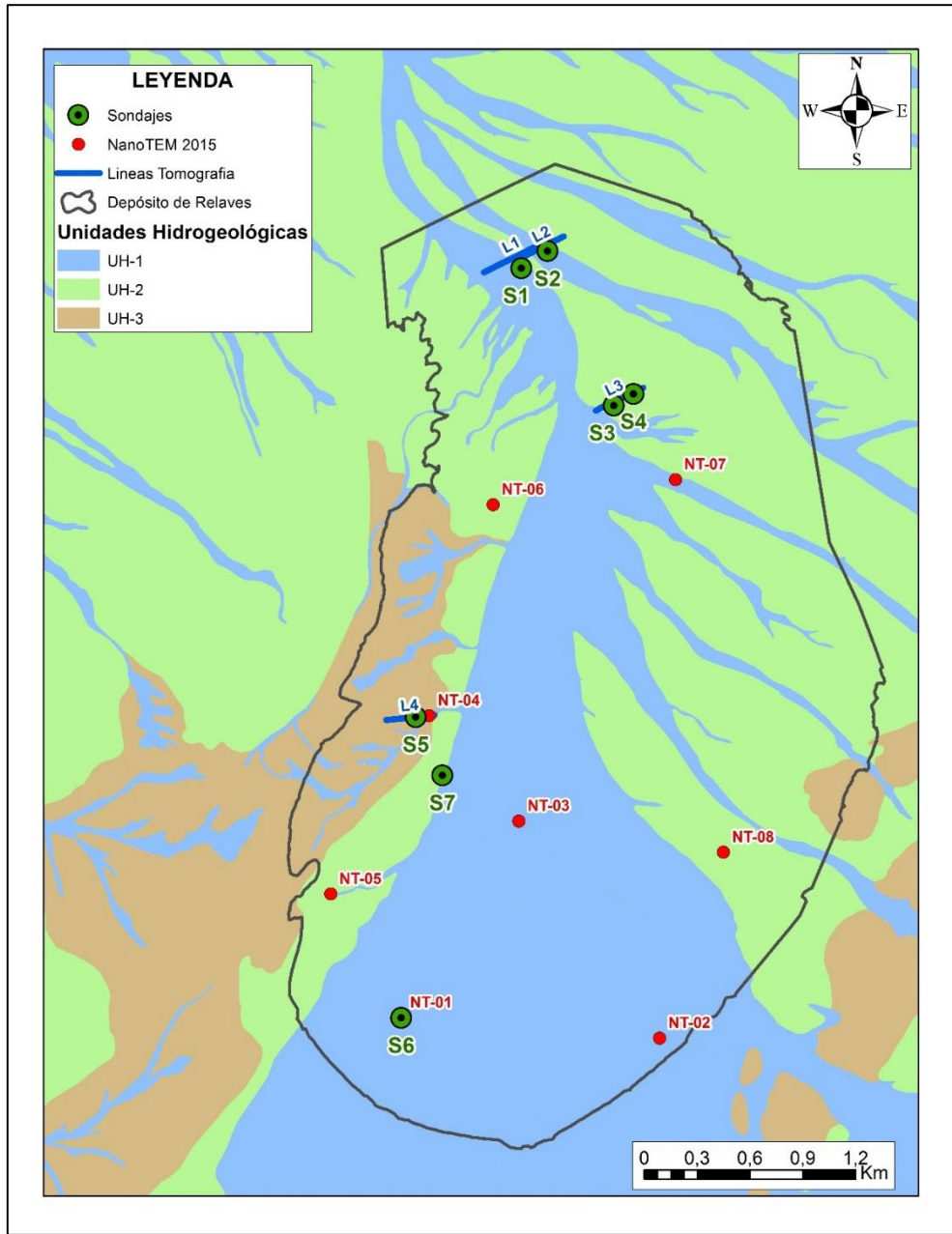


Figura 4-3: Ubicación de los sondajes en el depósito de relaves

5 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos y análisis realizados, tanto in-situ como de laboratorio. De su análisis e interpretación se obtiene la caracterización geotécnica e hidráulica necesaria para evaluar la posible infiltración de humedad proveniente del depósito de relaves hacia el suelo natural. Así mismo, esta caracterización entregará los valores necesarios para la modelación numérica.

5.1 Descripción del material

El material excavado en las calicatas entrega información sobre las capas más superficiales del depósito. Las muestras extraídas de los sondajes, en tanto, permiten caracterizar la totalidad de la potencia del relave y de los niveles más someros del suelo subyacente, al menos hasta profundidades en que se observó un aumento en el contenido de humedad, es decir hasta donde la propagación de humedad proveniente del relave está afectando al suelo natural.

El contraste de material perforado en los sondajes permitió establecer con precisión el límite relave-suelo, el cual posteriormente será contrastado con lo observado en los perfiles geofísicos. Esto permite, además, determinar la potencia del depósito en sus distintos sectores. Estos resultados se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Profundidad total, de contacto y potencia del relave en cada perforación

Nombre Sondaje	Profundidad Total (m)	Profundidad Contacto (m)
S1	42,5	24,9
S2	28	15
S3	29	16,6
S4	19,7	7,2
S5	27,8	8,5
S6	29	12,4
S7	29	21,5

Si bien el contacto relave-suelo en general es bastante claro, en los sondajes S2, S3 y S7 se ha identificado un nivel de transición de aproximadamente 0.5 metros, en el cual se observa una mezcla de material de ambas unidades.

El material del relave está constituido principalmente por sedimentos de tamaño arena fina a limo, de color gris a gris verdoso. Presenta un perfil de contenido de humedad relativamente homogéneo en todo su espesor, con algunas intercalaciones de menor o mayor humedad.

En terreno se observa un claro contraste de humedad entre el material del relave (alta a media) y el del suelo natural (baja a nula). A partir del contacto entre ambas unidades, se aprecia una disminución del contenido de humedad en profundidad, hasta alcanzar valores identificados como residuales o naturales.

Es importante destacar que en ninguna perforación se observó la ocurrencia de agua o niveles saturados en el suelo subyacente. Esto indica que, de existir migración vertical de humedad en profundidad, esta se comportaría como un flujo no saturado. La excepción a esto serían niveles aislados que presenten una permeabilidad secundaria mayor, generada por procesos estructurales y tectónicos.

5.2 Ensayos In-situ y de Laboratorio

Se realizaron ensayos tanto en el material del relave (calicatas y sondajes) como en el del suelo natural (sondajes). Los ensayos in-situ consistieron en permeabilidad tipo Lefranc y SPT. En laboratorio se analizó granulometría, gravedad específica, límites de Atterberg, hidrómetros y permeabilidad. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y sus respectivos análisis, separando lo obtenido para el material del relave y del suelo natural.

5.2.1 Relave

Los resultados de análisis de laboratorio para las muestras obtenidas del material de relave, las cuales se presentan ordenadas de menor a mayor profundidad. La Figura 5-1 grafica las curvas granulométricas obtenidas para cada una de ellas.

Tabla 5-2: Resultados de ensayos de laboratorio en muestras provenientes del material de relave

Muestra	Prof.	Granulometría		Límites de Consistencia			Clasificación USCS	Gravedad Específica	Contenido Humedad	Densidad Seca
		Arena	Finos	LL	LP	IP			%	ton/m ³
	(mbnt)	%	%	%	%	%				
CC-2 M1	0,65	20	80	24	23	1	ML	2,62	17,2	
CC-5 M1	1	19	81	25	19	6	CL-ML	2,79	16,3	
CC-1 M1	1,25	23	77	24	20	4	CL-ML	2,61	20,9	
CC-3 M1	2,05	24	76	30	26	4	ML	2,75	22,4	
CC-4 M1	2,05	34	66	24	17	7	CL-ML	2,75	15,7	
S4-LL-1	2,75								18,9	1,39
S7-LL-1	2,75	31	69	23	16	7	CL-ML	2,91	16,8	1,81
S4-CL-1	5,55	32	69	23	16	7	CL-ML	2,88	21,9	
S3-SPT-1	5,73	34	66	20	14	6	CL-ML	2,83		
S2-LL-1	5,75								17,7	1,84
S3-LL-1	5,75								18,5	1,8
S5-LL-1	5,75	27	73	25	17	8	CL	2,89	17	1,81
S6-LL-1	5,75	34	66	23	15	8	CL	2,9	16,5	1,57
S1-CL-1	6	32	68	21	16	5	CL-ML	2,85	21,1	
S2-CL-1	8	35	66	21	12	9	CL	2,91	17,3	
S1-LL-1	8,75	33	67	23	15	8	CL	2,93	19,8	1,63
S7-LL-2	8,75	35	66	20	15	5	CL-ML	2,83	14,7	1,78
S3-CL-1	9,5	36	64	19	15	4	CL-ML	2,86	13,7	
S1-SPT-1	11,25	32	69	21	16	5	CL-ML	2,83	16,6	
S6-LL-2	11,75	31	69	-	-	NP	ML	2,89	17,5	1,8
S3-LL-2	14,75								17	1,91
S1-LL-2	17,75	37	63	20	12	8	CL	2,84	18,3	1,79
S7-CL-1	19	30	70	-	-	NP	ML	2,84	20,4	

1) % Arena = Porcentaje retenido entre malla #4 y malla #200 (0.074 mm)

- 2) % Finos = Porcentaje que pasa la malla # 200
- 3) LL = Límite Líquido (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)
- 4) LP = Límite Plástico (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)
- 5) IP = Índice de plasticidad (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)
- 6) Clasificación USCS basada en norma ASTM D 2487-05
- 7) Gravedad específica bajo malla #4 según norma ASTM D-854
- 8) Humedad NCh 1515 Of. 1979

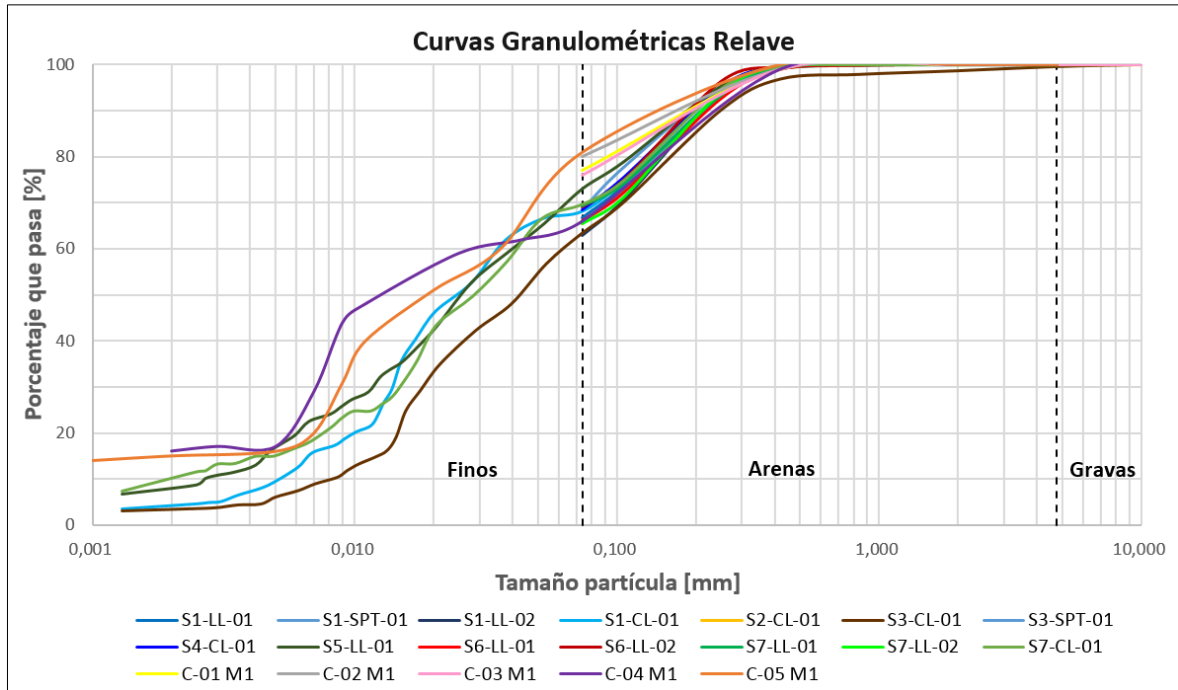


Figura 5-1: Curvas granulométricas del material de relave

Con los resultados de laboratorio se confirma que el material de relave obtenido de las calicatas y sondajes corresponde principalmente a limos arenosos y limos arcillosos, con predominancia de sedimentos finos inorgánicos (limos y arcillas) con un menor porcentaje de arenas finas de baja a media plasticidad.

Los valores de gravedad específica obtenidos en laboratorio se encuentran entre 2.61 y 2.93. Los valores más altos dentro de este rango se explican por la presencia de metales.

Los valores de densidad seca obtenidos a partir de las muestras obtenidas con Lexan Liner se encuentran entre los 1.39 t/m³ para los materiales más someros del relave, mientras que las muestras obtenidas a mayor profundidad alcanzan hasta 1.91 t/m³. Esto se explica por una mayor compactación en profundidad.

Por otro lado, los ensayos de densidad seca realizados in-situ en las calicatas mediante el método del cono de arena se muestran en la Tabla 5-3. Estos se encuentran dentro del rango obtenido en laboratorio.

Tabla 5-3: Resultados de densidad seca obtenidos in-situ

Muestra	Profundidad (m)	Humedad (%)	Densidad seca (t/m ³)
CC-1 D1	0	14	1,74
CC-2 D1	0,3	15,1	1,56
CC-3 D1	0,5	17,5	1,70
CC-4 D1	2,5	17,2	1,48
CC-5 D1	1	15,6	1,68

En cuanto a la permeabilidad, el relave, debido a su alto porcentaje de material fino y compactación, presenta valores bajos, con un valor promedio de 5.4×10^{-6} cm/s (4.6×10^{-3} m/d), lo cual dificulta considerablemente los flujos verticales (ver Tabla 5-4).

Tabla 5-4: Permeabilidades medidas en laboratorio para el material de relave (ASTM D 5084-03)

Unidad	Muestra	Permeabilidad (cm/s)
Relave	S1-LL-1	5,20E-06
	S3-LL-2	4,50E-06
	S5-LL-1	3,40E-06
	S7-CL-1	8,30E-06

Con el fin de evaluar el grado de compactación del material, se llevaron a cabo 9 ensayos de penetración SPT en el relave. Los resultados obtenidos (ver Tabla 5-5) revelan que en general el material se encuentra compacto, a excepción del material suelto presente en la superficie y al denso en profundidad (Terzhagi & Peck, 1996).

Cabe mencionar que el valor más alto, correspondiente a la muestra S3-SPT-2, se obtuvo en la zona de transición relave-suelo, lo cual explica su alta compactación.

Tabla 5-5: Resultados de ensayos de penetración SPT en relave

Tipo	Muestra	Profundidad (m)		SPT			
		Desde	Hasta	Golpes			N _{SPT}
				1	2	3	
Relave	S5-SPT-0	2,00	2,45	4	2	-	-
Relave	S4-SPT-1	3,50	3,95	11	9	8	17
Relave	S7-SPT-1	5,00	5,45	6	6	7	13
Relave	S3-SPT-1	5,50	5,95	6	8	11	19
Relave	S5-SPT-1	8,00	8,45	-	-	-	-
Relave	S6-SPT-1	8,00	8,45	3	4	3	7
Relave	S1-SPT-1	11,00	11,50	17	19	22	41
Relave	S7-SPT-2	11,00	11,45	5	6	11	17
Relave	S3-SPT-2	15,50	15,95	9	11	39	50

5.2.2 Suelo natural

El material obtenido a través de los sondajes pertenecientes al suelo de fundación está compuesto por sedimentos con distintos grados de compactación. Predominan las arenas y gravas, con niveles más arcillosos y limosos hacia el sur. Los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio se muestran en la Tabla 5-6. Las curvas granulométricas se grafican en la Figura 5-2.

Tabla 5-6: Resultados de ensayos de laboratorio para material del suelo de fundación

Muestra	Prof.	Granulometría			Límites de Consistencia			Clasificación USCS	Gravedad Específica	Contenido Humedad	Densidad Seca
		Grava	Arena	Finos	LL	LP	IP				
	(m)	%	%	%	%	%	%			%	ton/m ³
S1-LL-3	23,5									7,8	2
S1-CL-2	26,5	25	54	21	20	15	5	SC-SM	2,71	5,4	
S1-CL-3	40,5	19	58	23	17	12	5	SC-SM	2,81	4,7	
S2-CL-2	16,5	17	62	20	-	-	NP	SM	2,83	5,5	
S2-SPT-1	17,2	17	68	15	-	-	NP	SM	2,79	4,4	
S2-CL-3	26	24	54	22	23	14	9	SC	2,77	4,3	
S3-CL-2	18	42	45	13	17	12	5	SC-SM	2,83	4,2	
S3-SPT-3	23,2	15	58	27	20	13	7	SC-SM	2,8		
S3-CL-3	27,5	31	47	22	18	13	5	SC-SM	2,77	3,1	
S4-CL-2	9,2	34	44	22	23	16	7	0	2,82	3,7	
S4-CL-3	16,3	36	38	26	-	-	NP	SM	2,78	5	
S5-CL-2	10,5	1	26	74	52	27	25	CH	2,83	15,1	
S5-CL-3	18,4	22	30	49	36	25	11	SM	2,8		
S5-CL-4	27,5	14	55	31	40	21	19	SC	2,74		
S6-CL-1	14,3	3	46	51	23	14	9	CL	2,89		
S6-CL-2	17	9	60	31	18	12	6	SC-SM	2,82	4,9	
S6-HU-7	25,5									2,6	2,17
S6-CL-3	27	21	56	22	-	-	NP	SM	2,84		
S7-CL-2	26	33	48	19	20	12	8	SC	2,86		

1) % Grava = Porcentaje retenido entre malla 2 1/2" (63.5 mm) y malla #4 (4.76 mm)

2) % Arena = Porcentaje retenido entre malla #4 y malla #200 (0.074 mm)

3) % Finos = Porcentaje que pasa la malla # 200

4) LL = Límite Líquido (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)

5) LP = Límite Plástico (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)

6) IP = Índice de plasticidad (ASTM 4318-00 y NCh 1517 Of.79)

7) Clasificación USCS basada en norma ASTM D 2487-05

8) Gravedad específica bajo malla #4 según norma ASTM D-854

9) Humedad NCh 1515 Of. 1979

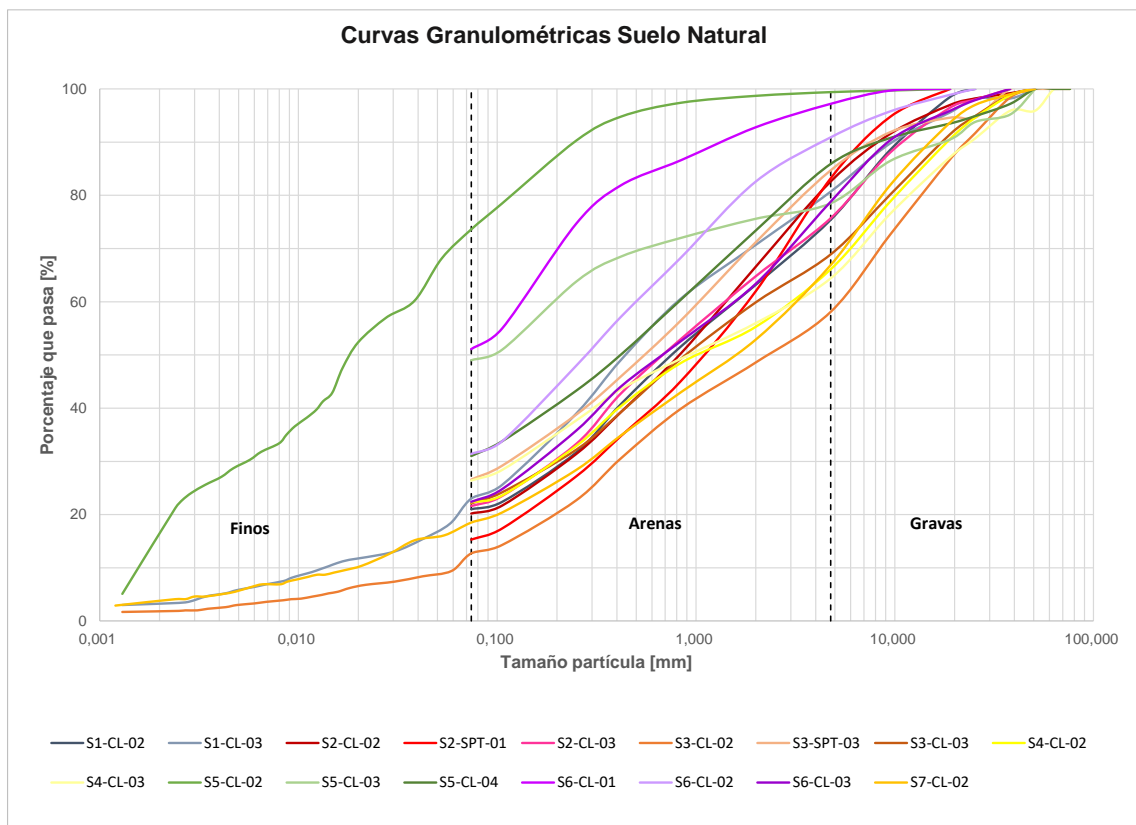


Figura 5-2: Curvas granulométricas del material de suelo de fundación

De los resultados se desprende que el suelo natural está compuesto principalmente por arenas limosas y arcillosas mal graduadas, con presencia de gravas. El porcentaje de arenas varía entre 38-68%, mientras que los finos se encuentran entre 13-27%.

Son excepciones a lo anterior las muestras obtenidas en el nivel más somero de suelo natural en los sondajes S5 (verde) y S6 (rosado), las cuales presentan una predominancia de material fino, el cual conforma más del 49%. Destaca la muestra S5-CL-2, cuyo contenido se clasifica como arcillas de alta plasticidad (CH).

El sondaje S5 fue perforado en una litología subyacente distinta al resto, correspondiente a depósitos sedimentarios de mayor edad y consolidación, lo cual explica su distribución granulométrica distinta al resto.

Observando el contenido de humedad en profundidad, se aprecian valores en torno al 5%, considerados como residuales o naturales en este tipo de depósitos. Es decir, este contenido de humedad es inherente al suelo de fundación, y no se evidencia un aporte de humedad proveniente del material de relave depositado sobre éste.

La muestra S5-CL-2, obtenida a 10.5 metros de profundidad, constituye una excepción destacable, con un contenido de humedad de 15.1%. Esto se explica por su granulometría, clasificándose como una arcilla plástica, las cuales tienden a almacenar agua y a no transmitirla, por lo que su mayor contenido de humedad se encuentra dentro de lo normal y perfectamente puede ser de origen natural.

Los valores de permeabilidad obtenidos en laboratorio se encuentran entre los 1.3×10^{-4} y los 1.2×10^{-3} cm/s (0.1×10^{-1} y 1.12×10^{-1} m/d, respectivamente), lo cual se encuentra en rangos de baja a muy baja permeabilidad (Tabla 5-7).

Tabla 5-7: Permeabilidades medidas en laboratorio para el material de suelo natural (ASTM D 5084-03)

Unidad	Muestra	Permeabilidad (cm/s)
Suelo Natural	S1-LL-3	1,30E-04
	S3-CL-2	1,70E-03
	S7-CL-2	1,20E-03

La permeabilidad in-situ fue medida mediante ensayos tipo Lefranc a carga variable, una vez finalizada cada perforación. Estos ensayos se realizaron sólo en el suelo de fundación y los valores obtenidos concuerdan con los medidos en laboratorio Tabla 5-8.

Tabla 5-8: Resultados ensayos de permeabilidad tipo Lefranc

Sondaje	Permeabilidad (cm/s)
S1	2,33E-04
S2	1,56E-05
S3	2,44E-03
S4	4,07E-05
S5	1,73E-05
S6	2,04E-03
S7	4,86E-04

Las permeabilidades estimadas mediante este ensayo in-situ corresponden a permeabilidad horizontal. La mayor consolidación y compactación de este material apunta a una permeabilidad vertical aún menor, por lo que estos estratos actuarían de manera semipermeable a impermeable, evitando, en caso de existir, la filtración de flujos provenientes de la depositación de material de relave, así como su avance por niveles no saturados.

Los ensayos de penetración SPT realizados en esta unidad la clasifican como un suelo denso, obteniéndose rechazo (más de 50 golpes) en cinco de los siete ensayos aplicados, mientras que en los dos restantes se obtuvieron valores de suelo denso, presentados en la Tabla 5-9 .

Tabla 5-9: Resultados de ensayos de penetración SPT en suelo natural

Unidad	Muestra	Profundidad (m)		SPT			
		Desde	Hasta	Golpes			N _{SPT}
				1	2	3	
Suelo natural	S6-SPT-02	14,00	14,45	9	18	27	45
Suelo natural	S2-SPT-01	17,00	17,45	46	38	49	87

5.3 Exploración geofísica y correlación con sondajes

A continuación, se presentan los perfiles obtenidos con la exploración geofísica, y estos se correlacionan con los perfiles estratigráficos descritos en terreno ubicados en sus inmediaciones.

A modo general, se distinguen dos principales grupos de resistividades, descritas a continuación:

- Nivel superior de baja resistividad: Presenta valores de menores a 2 Ohm-m, considerados de baja resistividad, y se asocian a la unidad de depósito de relaves. Dicha correlación se ilustra en las Figura 5-3 a Figura 5-8 . Las variaciones de resistividad observadas se asociarían al grado de contenido de humedad y al material que compone dicho relave.
- Nivel inferior de mayor resistividad: Corresponde al suelo natural, nivel que subyace al depósito de relaves. Presenta valores de resistividad más altos, mayores a 5 Ohm-m. Dentro del mismo nivel se observan sectores con resistividad intermedia (entre 2 y 5 Ohm-m), los cuales podrían asociarse a zonas de terreno natural con un mayor contenido de humedad o con una mayor presencia de arcillas.

Lo observado gracias a las perforaciones concuerda con los resultados del estudio geofísico, principalmente en las dos categorías de resistividad identificadas; relave y suelo natural, así como el límite entre ambas. Como se verá más adelante, dicho límite también marca un contraste en el contenido de humedad entre ambas unidades, donde el relave presenta valores más altos y el suelo subyacente, valores más bajos que disminuyen en profundidad hasta alcanzar su humedad residual o natural.

A continuación, se presentan correlaciones entre lo observado con la geofísica y la información proporcionada por las perforaciones, en aquellas zonas donde es posible un traslape entre ambas. Posteriormente se añadirá el contenido de humedad a estas correlaciones.

5.3.1 Línea Tomográfica L1 y Sondaje S1

La distribución de resistividades del perfil L1 (Figura 5-3) muestra la existencia de un primer estrato somero de resistividad media-baja (menos de 3 Ohm-m), formado por una capa de relave húmedo de unos 5 metros de potencia, seguido por un segundo nivel subyacente de mayor resistividad (5-10 Ohm-m), que correspondería al muro de contención presente en la zona, con una potencia de 5-10 metros. Luego, se encuentra un tercer nivel de resistividad media (menos de 4 Ohm-m), con potencia de 15 metros y cuya base concuerda con la topografía natural y correspondería a material de relave con un contenido de humedad menor al más superficial. En conjunto, estos tres niveles constituyen el material antrópico asociado al depósito de relaves en esta zona.

Bajo los niveles anteriormente descritos, se encuentra el material de alta resistividad (más de 5 Ohm-m), de gran potencia y que correspondería al material del suelo de fundación.

El sondaje S1 se encuentra a 75 metros hacia el sur del Perfil Tomográfico L1, en el sector más profundo de la quebrada principal, la cual podría actuar como una vía de posibles flujos en profundidad. No se perforó más cerca de la Línea L1 para evitar una perforación del muro de contención.

El límite entre el relave y el suelo natural se midió a los 24.9 metros de profundidad en el sondaje S1, lo cual a su vez concuerda con los observado en el perfil (Figura 5-3), teniendo en cuenta la distancia entre ambos en planta.

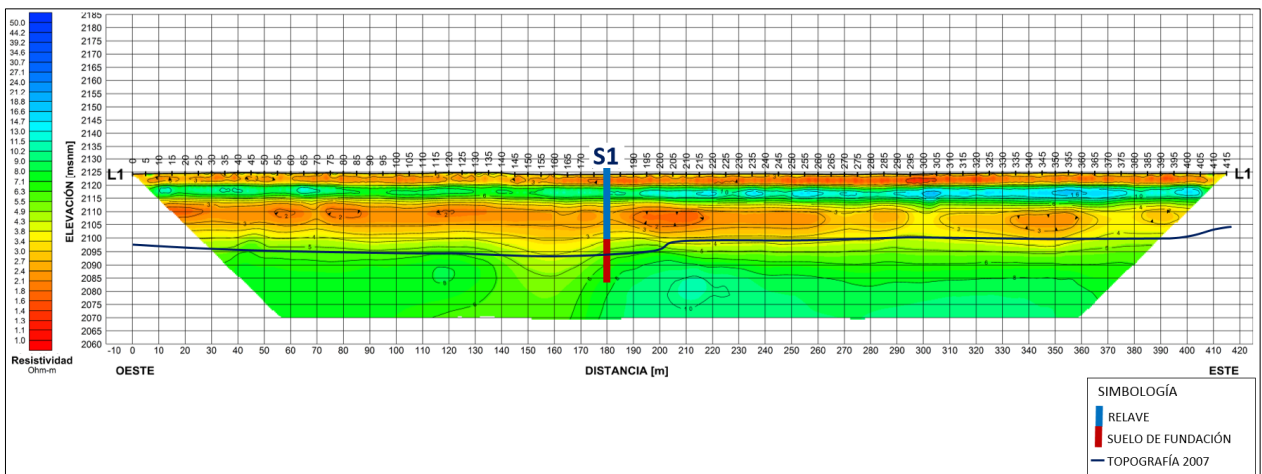


Figura 5-3: Proyección aproximada del sondaje S1 con respecto al Perfil L1

5.3.2 Línea Tomográfica L2, Sondaje S2 y NanoTEM NT-10

El Perfil L2 se trazó hacia el oriente del L1, pero desplazado hacia el sur para no incluir el muro de contención y que este no afecte las resistividades medidas.

En este caso (Figura 5-4), los primeros 12 metros de profundidad corresponden a un material conductor, con resistividades entre los 1-2 Ohm-m, el cual correspondería a relave húmedo. Los siguientes 15 metros presentan una resistividad mayor, indicando un material de relave con un menor contenido de humedad. A partir de los 27 metros de profundidad y bajo este relave antrópico, se encuentra el material menos conductor, con resistividades sobre 10 Ohm-m, correspondiente al suelo natural.

El smooth del NT-10 confirma la existencia del nivel más somero de mayor conductividad (relave húmedo), con una resistividad de 1 Ohm-m y que se extiende hasta los 12 metros de profundidad. Posteriormente, la resistividad aumenta constantemente hasta alcanzar 60-90 Ohm-m (escala logarítmica) a los 25 metros de profundidad (relave menos húmedo). A partir de los 27 metros, la resistividad permanece en torno a los 100 Ohm-m, valor que se mantiene hasta la mayor profundidad (suelo natural).

EL sondaje S2, así como el S1, fue perforado a 30 metros del Perfil L2 para evitar perforar el muro de contención, quedando sobre la cubeta de éste. En esta perforación, el límite relave-suelo se observó a los 15 metros de profundidad.

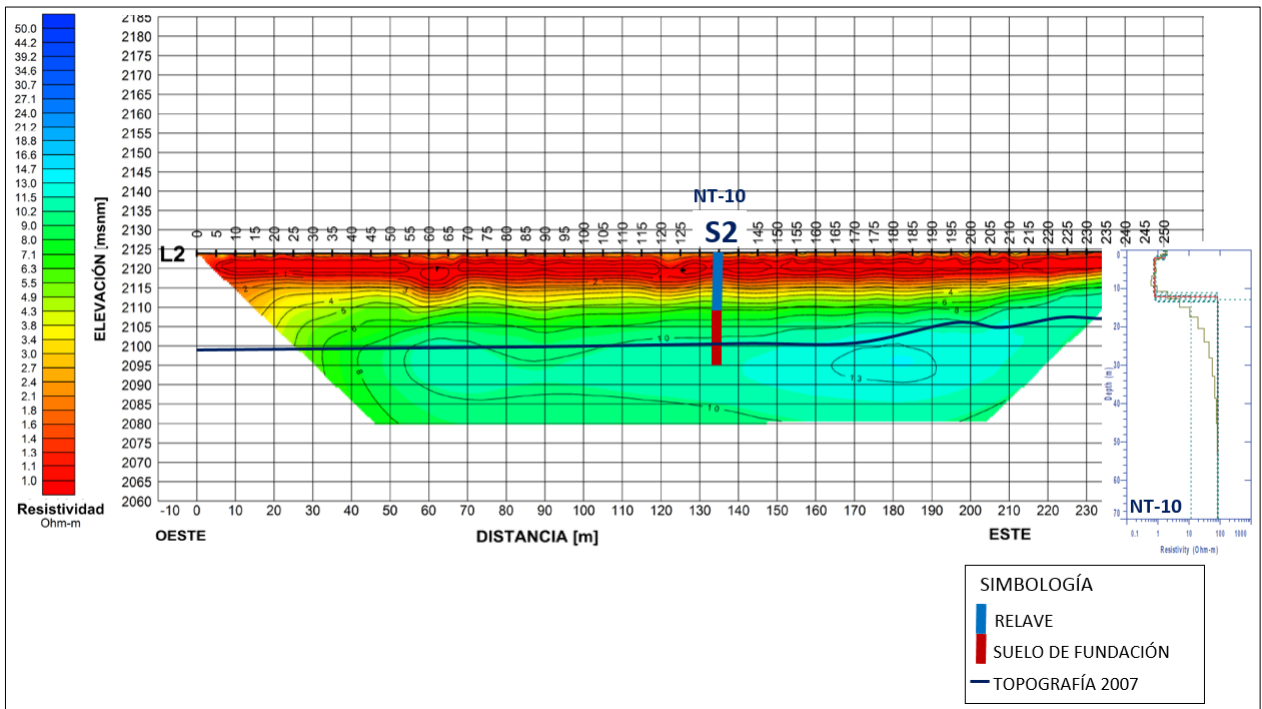


Figura 5-4: Proyección aproximada del sondaje S2 con respecto al Perfil L2

5.3.3 Línea Tomográfica L3, Sondajes S3-S4 y NanoTEM NT-9

La Línea Tomográfica L3, mostrada en la Figura 5-5, presenta un estrato superficial de baja resistividad, cuya potencia varía entre los 25 metros al oeste y 10 metros al este, y que representa una capa de relave húmedo. El primer par de metros, sin embargo, tiene baja conductividad, reflejando su menor contenido de humedad debido a su exposición a la radiación y consecuente evaporación.

Subyacente al primer nivel, se observa el relave más seco y de mayor resistividad, de una potencia de 5-10 metros.

Bajo el material antrópico se ubica la unidad con mayor resistividad, correspondiente al suelo de fundación. En sus primeros metros se observan resistividades relativamente menores (2-5 Ohm-m), presumiblemente debido a un mayor contenido de humedad o a la presencia de sedimentos finos, y cuya zona de mayor potencia, ubicada hacia el oeste, corresponde a relleno sedimentario en una quebrada. En el nivel más profundo, que correspondería a depósitos más consolidados y secos, se midieron resistividades menores a 5 Ohm-m.

El perfil NanoTEM NT-09, ubicado en el punto 80 de L3, confirma la existencia de un primer nivel de baja resistividad (relave húmedo), en torno a 1 Ohm-m, hasta los 12 metros de profundidad. Luego, la resistividad asciende hasta alcanzar los 100 Ohm-m a los 23 metros de profundidad, marcando la transición relave-suelo natural más húmedo, límite concordante con la topografía original. A mayor profundidad, ya dentro del suelo natural, la resistividad alcanza los 300 Ohm-m.

Los resultados de la exploración geofísica concuerdan con lo visto en la perforación del sondaje S3, en el cual el límite relave-suelo se encuentra a los 16.6 metros de profundidad, a partir de donde el contenido de humedad decrece paulatinamente hasta alcanzar la humedad residual característica del suelo de fundación. En el sondaje S4, en tanto, la transición relave-suelo se detectó a los 7.2 metros de profundidad, luego de lo cual la humedad desciende significativamente, presentando valores naturales a partir de los 9 metros.

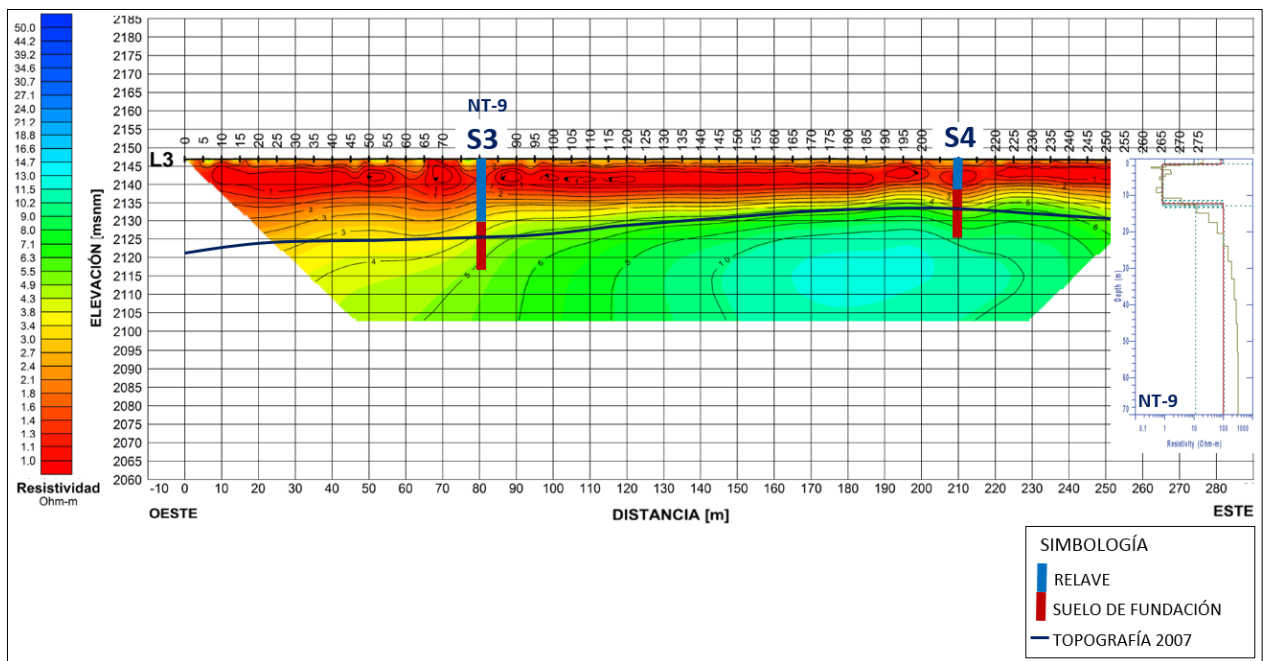


Figura 5-5: Ubicación de Sondajes S3 y S4 con respecto al Perfil L3

5.3.4 Línea Tomográfica L4, Sondaje S5 y NanoTEM NT-4

El Perfil L4, presentado en la Figura 5-6, presenta un nivel superior conductor con resistividades menores a 2 Ohm-m de potencia variable, con un máximo de 25 metros en el sector este, profundidad mayor a la topografía original. Esto refleja un mayor contenido de humedad en el suelo de fundación de dicha zona, o una litología de mayor conductividad (material fino). En el sector oeste, en tanto, este nivel tiene un espesor de 7 metros.

En el sondaje S5 se identificó el límite relave-suelo a los 7.2 metros. De acuerdo a lo observado durante la perforación, el contenido de humedad es bajo casi nulo a partir de los 18 metros, observación coincidente con la isolínea del NanoTEM NT-4 de 3 Ohm-m. De acuerdo a lo observado en este perfil, esta mayor conductividad del suelo subyacente no se extiende más allá de los 15 metros bajo el límite relave-suelo.

La litología descrita en el sondaje S5 difiere a la del resto de las perforaciones, observándose niveles limolíticos y arenosos rojos, en algunos con más presencia de arcillas, pertenecientes a depósitos sedimentarios de edad Oligocena. Por lo anterior, las menores resistividades podrían deberse al material fino consolidado y no a un mayor contenido de humedad.

Con los resultados del NanoTEM NT-4, en tanto, se corrobora la existencia de un nivel superior conductor hasta los 8 metros de profundidad y un tenue ascenso constante de la resistividad hasta los 14 metros, coincidente con la topografía original en ese sector. A mayor profundidad, ya en material del suelo natural, la resistividad se mantiene entre los 5-10 Ohm-m, valores menores a lo observado en otros perfiles, presumiblemente debido a la litología particular descrita en el sondaje S5.

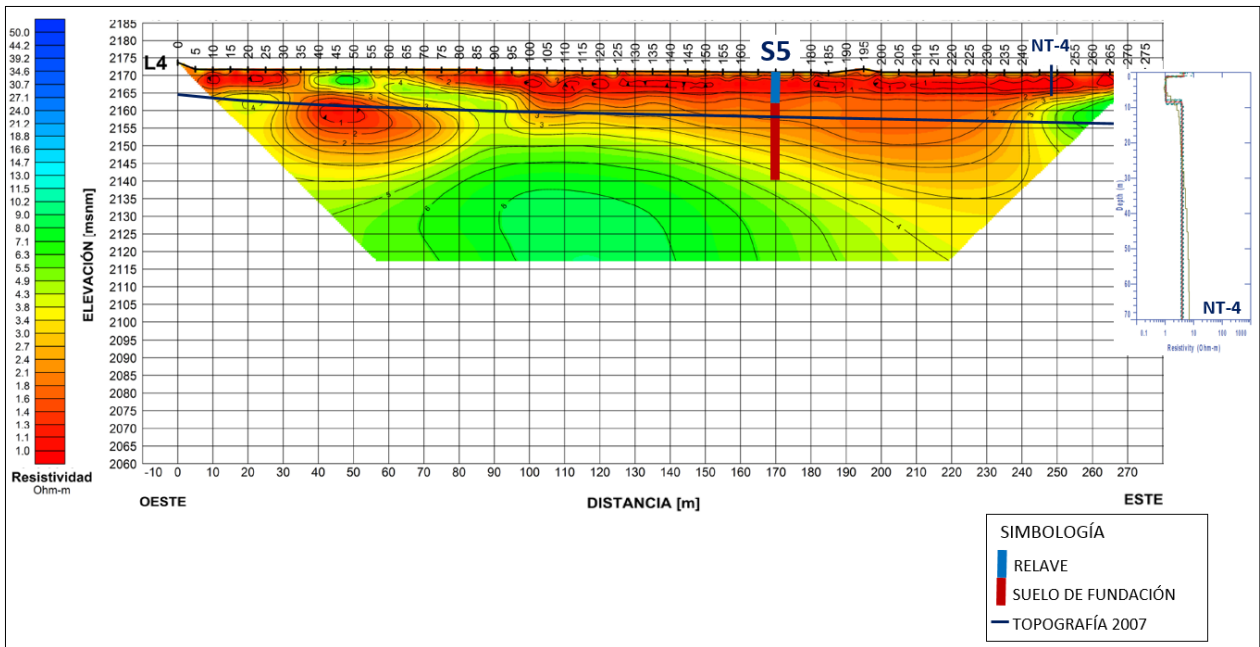


Figura 5-6: Ubicación del Sondaje S5 con respecto al Perfil L4

5.3.5 Sondaje S6 y NanoTEM NT-1

Tanto en el sondaje S6 como en el NanoTEM NT-1 (Figura 5-7), se observa la transición relave-suelo en torno a los 12 metros de profundidad, donde la resistividad pasa de 1 a 12 Ohm-m aproximadamente. Durante la perforación del sondaje S6 se observó una paulatina disminución del contenido de humedad a partir del límite relave-suelo hasta los 24 metros de profundidad, a partir de donde es baja o nula, resultado coincidente con los resultados del perfil NT-1.

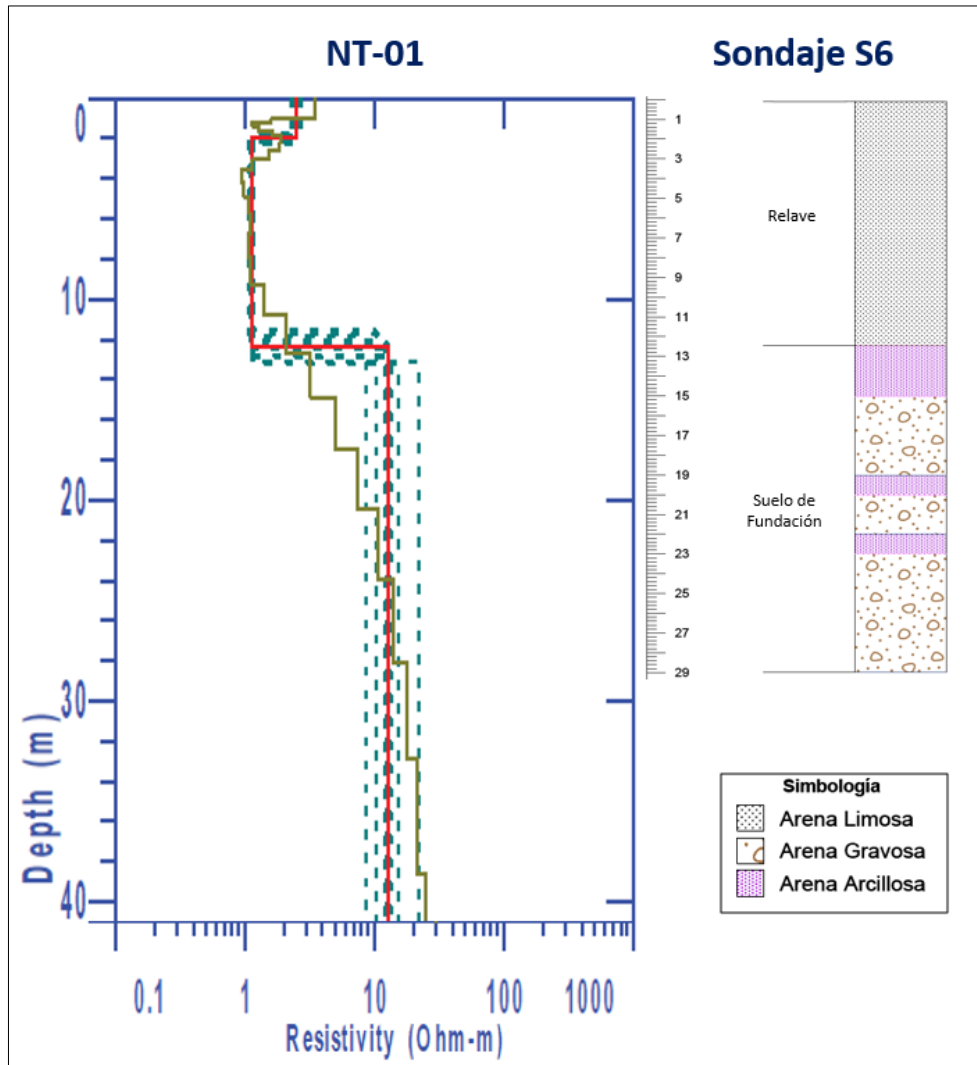


Figura 5-7: Correlación del Sondaje S6 y el NT-1

5.3.6 Sondaje S7 y NanoTEM NT-5

El sondaje S7 se perforó aproximadamente a 240 metros hacia el este del NanoTEM NT-5, por lo que diferencias entre ambos son esperables, las que de todos modos no son significativas. El límite relave-suelo se identificó a los 21.5 metros de profundidad en el sondaje, mientras que en el NT-5 se aprecia un aumento de la resistividad (de 1 a 20 Ohm-m aproximadamente) a partir de los 18 metros bajo el nivel de terreno (Figura 5-8).

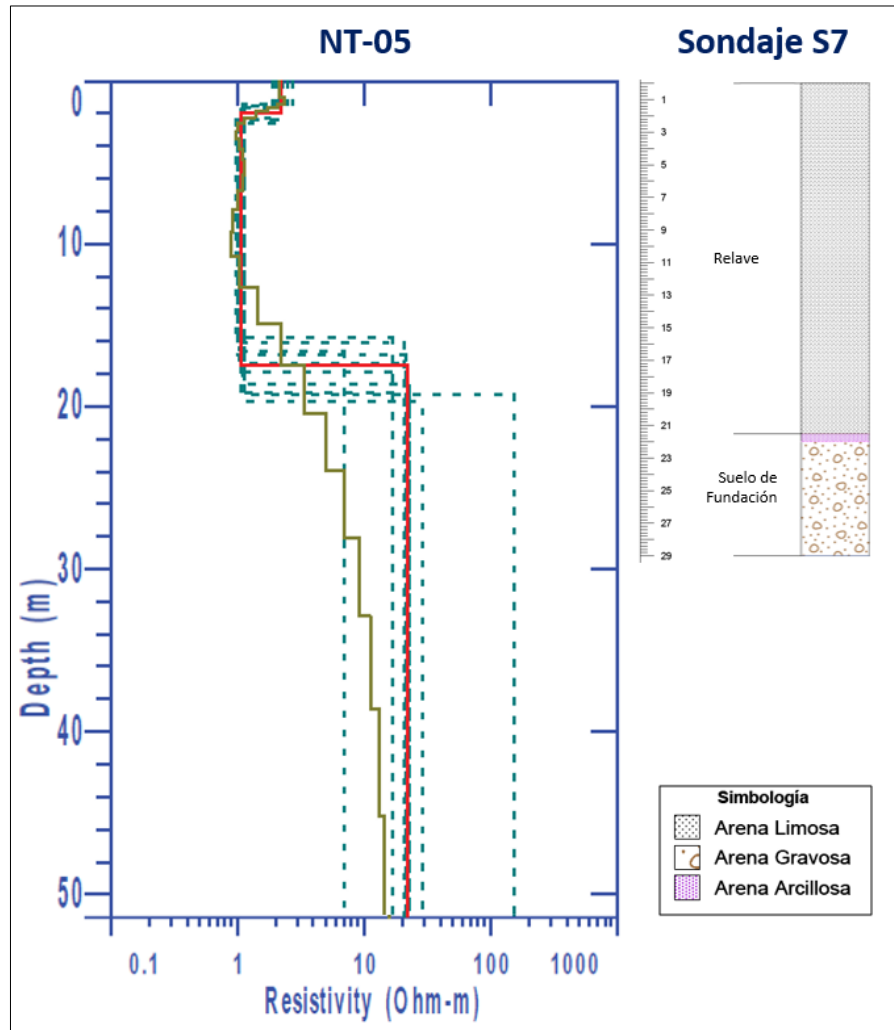


Figura 5-8: Correlación del Sondaje S7 y el NT-5

5.4 Resultados de Humedad medida en Laboratorio

Se realizaron ensayos para determinar el contenido de humedad tanto en muestras de calicatas (relave) como de sondajes (relave y suelo). Estos resultados son de suma importancia para evaluar la existencia y/o magnitud del flujo desde el depósito hacia el suelo natural, así como en la parametrización de ambos para la modelación numérica.

Los resultados para las muestras obtenidas en calicatas y sondajes se presentan en las Tabla 5-10 y Tabla 5-11, respectivamente. El perfil de humedad medido en los sondajes se ilustra en la Figura 5-9.

Tabla 5-10: Contenido de humedad medido en calicatas

Litología	Muestra	Profundidad (m)	Humedad (%)
Relave	CC-1 M1	0,0	14
	CC-2 M1	0,3	15,1
	CC-3 M1	0,5	17,5
	CC-4 M1	0,7	17,2
	CC-5 M1	1,0	15,6
	CC-1 D1	1,0	16,3
	CC-2 D1	1,3	20,9
	CC-3 D1	1,6	22,4
	CC-4 D1	2,1	15,7
	CC-5 D1	2,5	17,2

Tabla 5-11: Contenido de humedad medido en sondajes S1, S2, S3

S1			S2			S3			
Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)	Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)	Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)	
Relave	0,7	17,5	Relave	1,5	19,2	Relave	2,50	11,0	
	1,5	18,7		3,5	16,8		4,50	15,5	
	2,5	18,5		5,8	17,7		5,75	18,5	
	4,5	17,9		6,8	17,3		8,50	15,9	
	6,0	21,1		8,0	17,3		9,50	13,7	
	7,2	17,8		8,5	17,4		10,50	14,5	
	8,8	19,8		12,5	19,1		13,50	18,6	
	11,3	16,6		14,2	15,2		14,75	17,0	
	11,8	17,5	Suelo Natural	16,5	5,5	16,00	8,7		
	12,8	18,1		15,5	5,7	16,50	11,9		
	13,8	17,0		17,2	4,4	18,00	4,2		
	15,6	16,7		17,7	6,3	19,03	7,9		
	17,8	18,3		22,6	5,4	22,60	4,1		
	19,5	16,1		26,0	4,3	23,23	0,0		
	20,5	16,0		25,6	4,6	25,50	4,7		
	21,5	15,8	27,6	4,9	27,50	3,1			
	22,5	16,5	Suelo Natural	28,90	3,7	Suelo Natural	28,90	3,7	
23,5	7,8	Suelo Natural		26,5	5,4		Suelo Natural	26,5	5,4
24,7	8,6			28,5	6,0			30,0	5,4
26,5	5,4			30,0	5,4			32,0	5,3
28,5	6,0			32,0	5,3			40,5	4,7
30,0	5,4		40,5	4,7	41,0	5,9			

Tabla 5-12: Contenido de humedad medido en sondajes S4, S5, S6 y S7

S4		
Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)
Relave	2,75	18,9
	3,73	17,4
	5,55	21,9
Suelo Natural	7,80	17,1
	9,20	3,7
	11,23	8,0
	12,30	2,6
	14,23	4,6
	14,30	4,9
	16,25	5,0
	17,60	3,9
19,60	4,0	

S5		
Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)
Relave	3,10	19,1
	5,75	17,0
	7,50	18,5
	8,35	16,5
Suelo Natural	10,50	15,1
	11,90	8,4
	13,50	14,3
	15,30	4,0
	16,80	7,2
	20,30	6,6
	21,50	2,7
	23,50	3,3
	25,50	2,8

S6		
Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)
Relave	3,50	15,4
	5,75	16,5
	7,50	17,3
	10,50	16,7
	11,75	17,5
Suelo Natural	17,00	4,9
	16,50	8,5
	21,55	5,4
	23,50	5,4
	25,50	2,6
	28,50	3,8

S7		
Unidad	Profundidad (m)	Humedad (%)
Relave	1,50	18,4
	2,75	16,8
	5,23	8,4
	6,50	11,5
	8,75	14,7
	9,65	19,3
	11,23	13,7
	13,50	16,7
	19,00	20,4
	19,50	16,2
	Suelo Natural	22,50
24,50		4,1
28,50		3,9

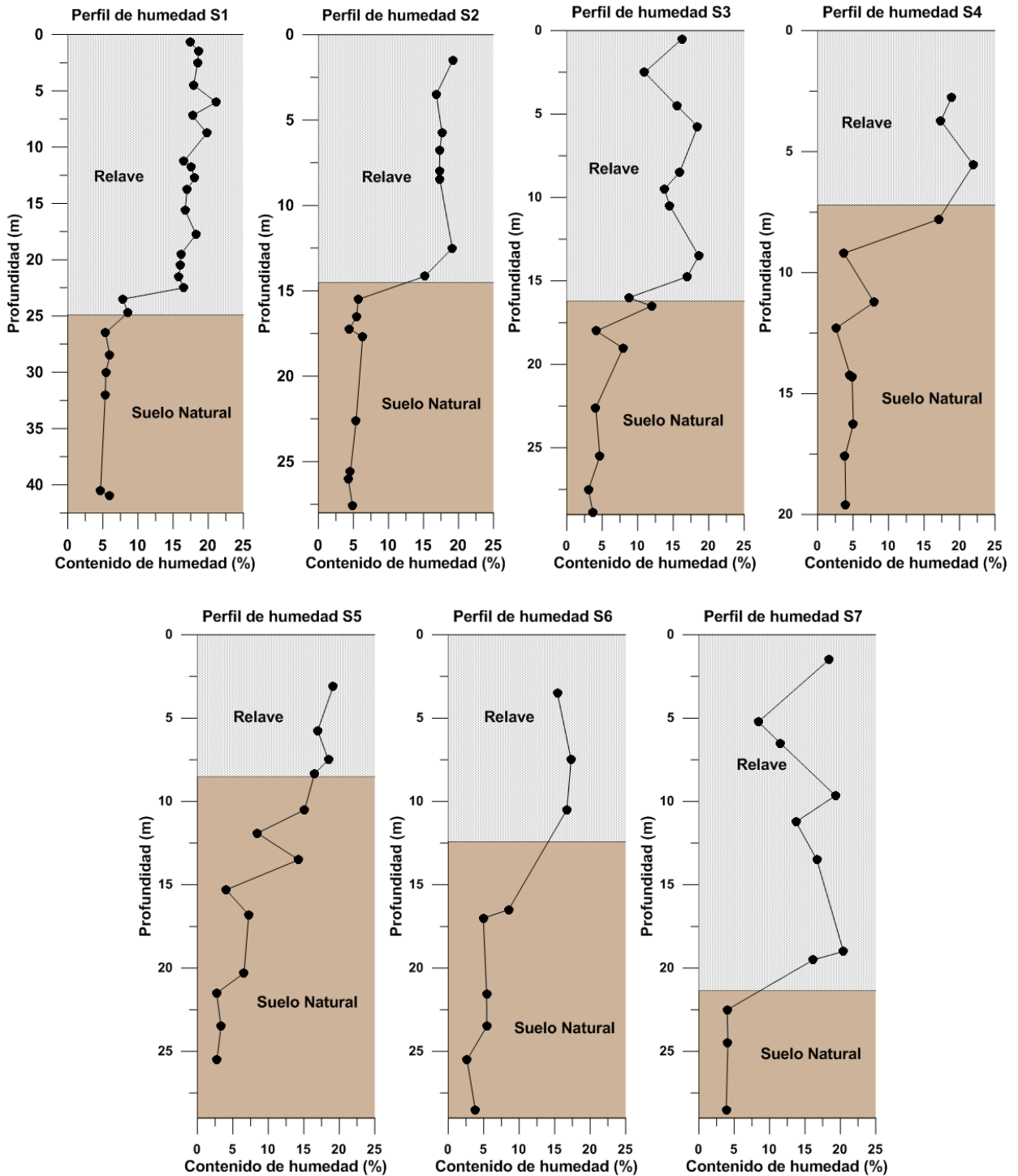


Figura 5-9: Perfiles de humedad de sondajes

De los resultados obtenidos, a modo general se observa que, para el material de relave, los valores de contenido de humedad fluctúan en torno al 17%, mientras que el suelo natural presenta valores bastante menores, en torno al 5% (humedad residual o natural).

En los sondajes S1 y S2, ubicados en quebradas naturales, cerca del muro de contención J1 y aguas abajo del depósito, se observa un cambio abrupto en el contenido de humedad más allá del límite relave-suelo, pasando de un 17% a un 5% en unos pocos metros. Esto evidencia una baja o nula infiltración vertical proveniente del material depositado.

En los sondajes S3 y S4, cercanos al muro J2, se aprecia una disminución más gradual del contenido de humedad luego de traspasar el contacto relave-suelo, alcanzando valores residuales de humedad a los 3-4 metros respectivamente. Esto representa una zona de transición entre ambas unidades, tras lo cual se mantiene un valor de 5% de contenido de humedad hasta el final de las perforaciones (más de 20 metros de profundidad).

El sondaje S5 presenta un mayor contenido de humedad en el suelo natural en sus primeros metros (no más allá de 8 metros profundidad), con dos mediciones en torno al 15%. Luego, la humedad desciende gradualmente hasta estabilizarse en valores naturales a los 15 metros de profundidad y hasta el fondo del pozo. Como ya se ha mencionado, este sondaje se emplaza sobre depósitos naturales distintos al resto, donde predominan los materiales finos y de alta plasticidad (Tabla 5-6 y Figura 5-2), por lo que la humedad puede ser de origen natural y de baja o nula transmisión. Este comportamiento es normal en depósitos de estas características (muestra S5-CL-2 presenta un 74% de material fino), con una tendencia a almacenar agua debido a su alta porosidad, pero con una baja permeabilidad. La Figura 5-14 muestra que este mayor contenido de humedad se encuentra contenido exclusivamente en este nivel con las características descritas.

Los sondajes S6 y S7, emplazados al sur del depósito de relaves, también presentan un descenso abrupto en el porcentaje de humedad entre el material del relave y el del suelo natural, con una caída del 12%, lo cual apunta a una baja o nula infiltración vertical de humedad.

Para hacer una comparación unificada de los ensayos y exploraciones realizadas, a continuación, se presenta la correlación entre los perfiles tomográficos, la litología y los perfiles de humedad en profundidad para los sondajes S1 a S5, ilustrado en las Figura 5-10 a Figura 5-14. Las Figura 5-15 y Figura 5-16, en tanto, comparan las mediciones con NanoTEM, la litología y los perfiles de humedad para los sondajes S6 y S7.

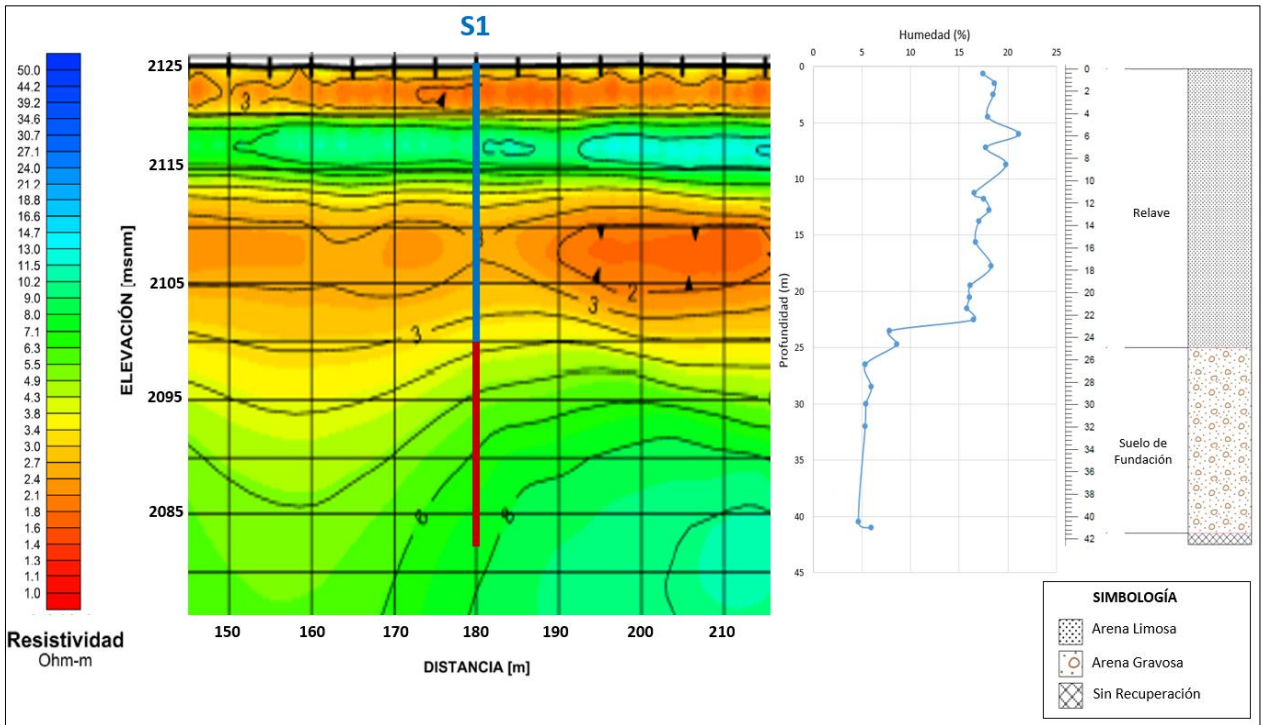


Figura 5-10: Correlación entre el perfil tomográfico L1 y la litología/humedad presente en el sondaje S1

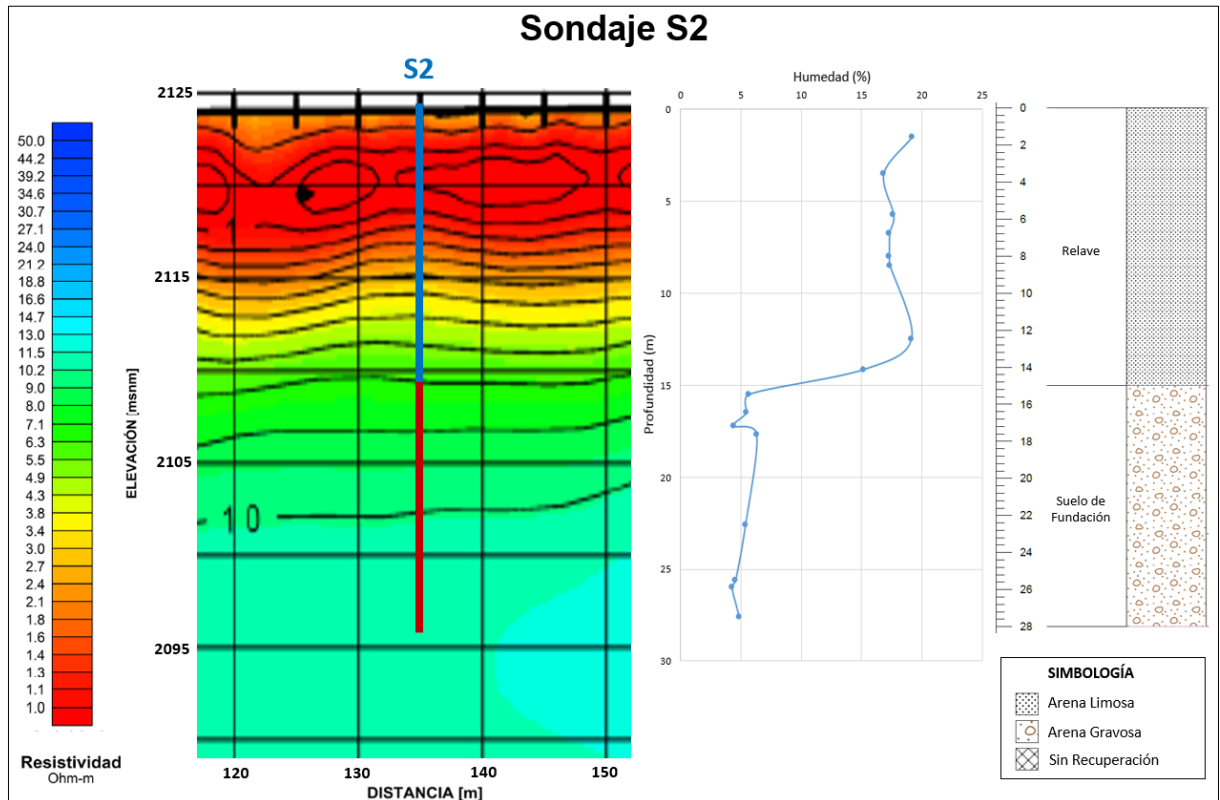


Figura 5-11: Correlación entre el perfil tomográfico L2 y la litología/humedad presente en el sondaje S2

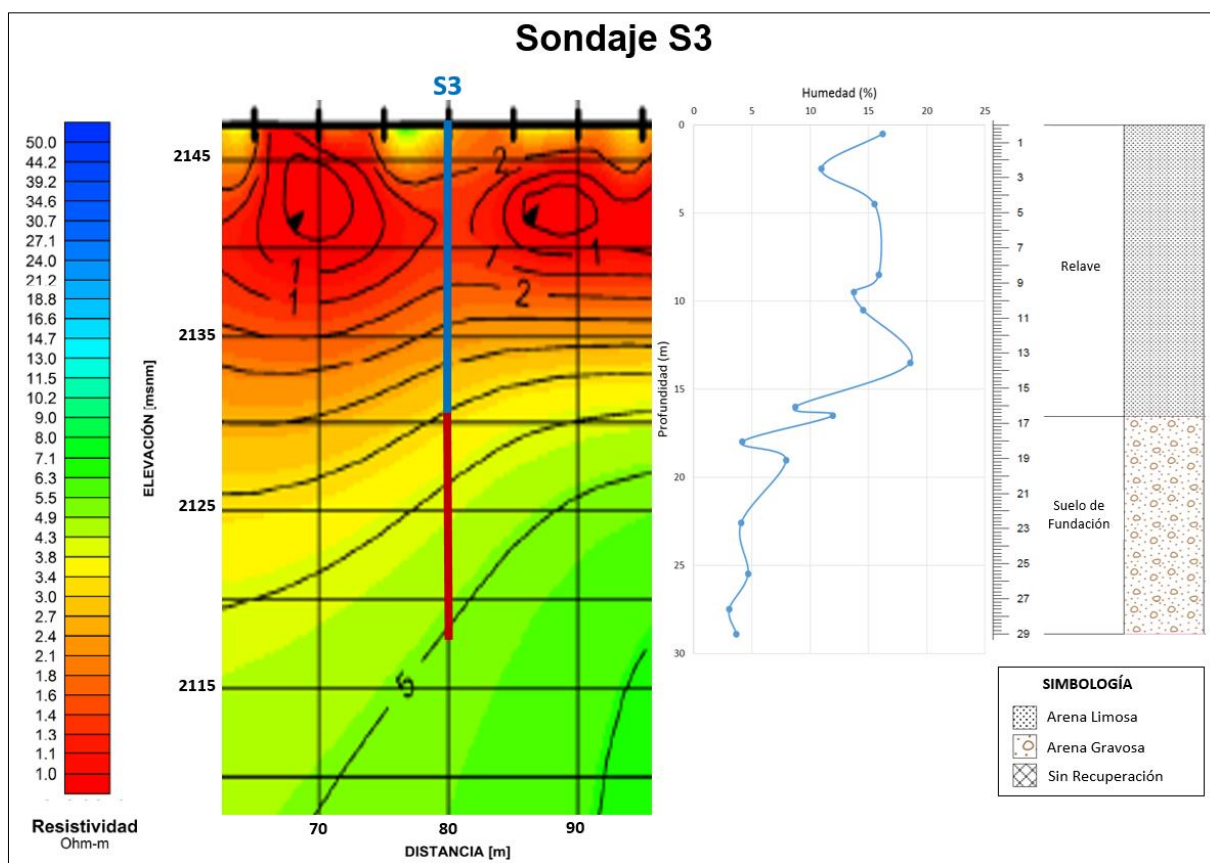


Figura 5-12: Correlación entre el perfil tomográfico L3 y la litología/humedad presente en el sondaje S3

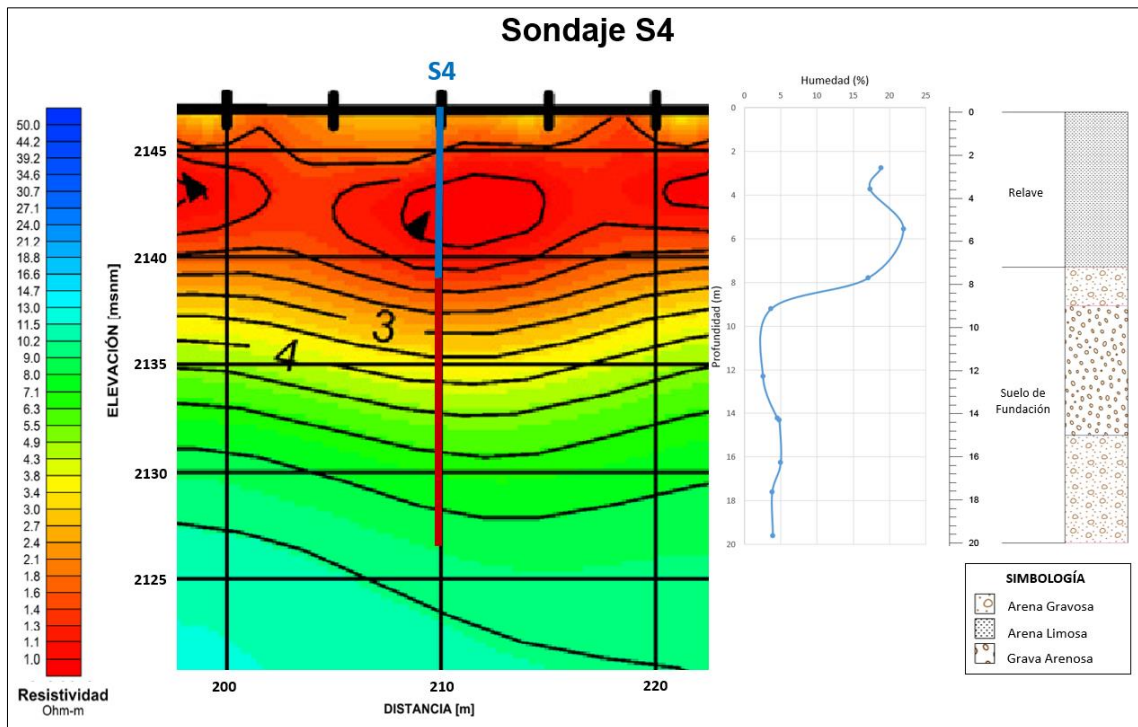


Figura 5-13: Correlación entre el perfil tomográfico L3 y la litología/humedad presente en el sondaje S4

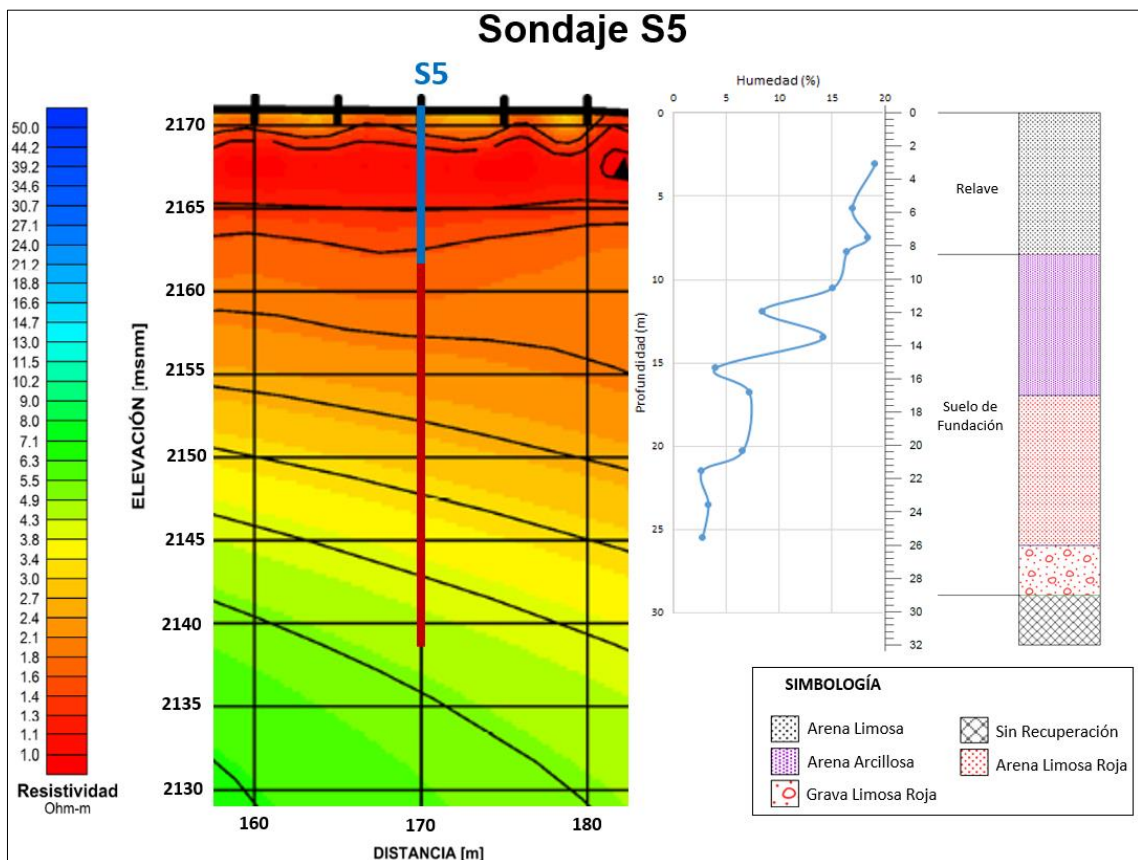


Figura 5-14: Correlación entre el perfil tomográfico L4 y la litología/humedad presente en el sondaje S5

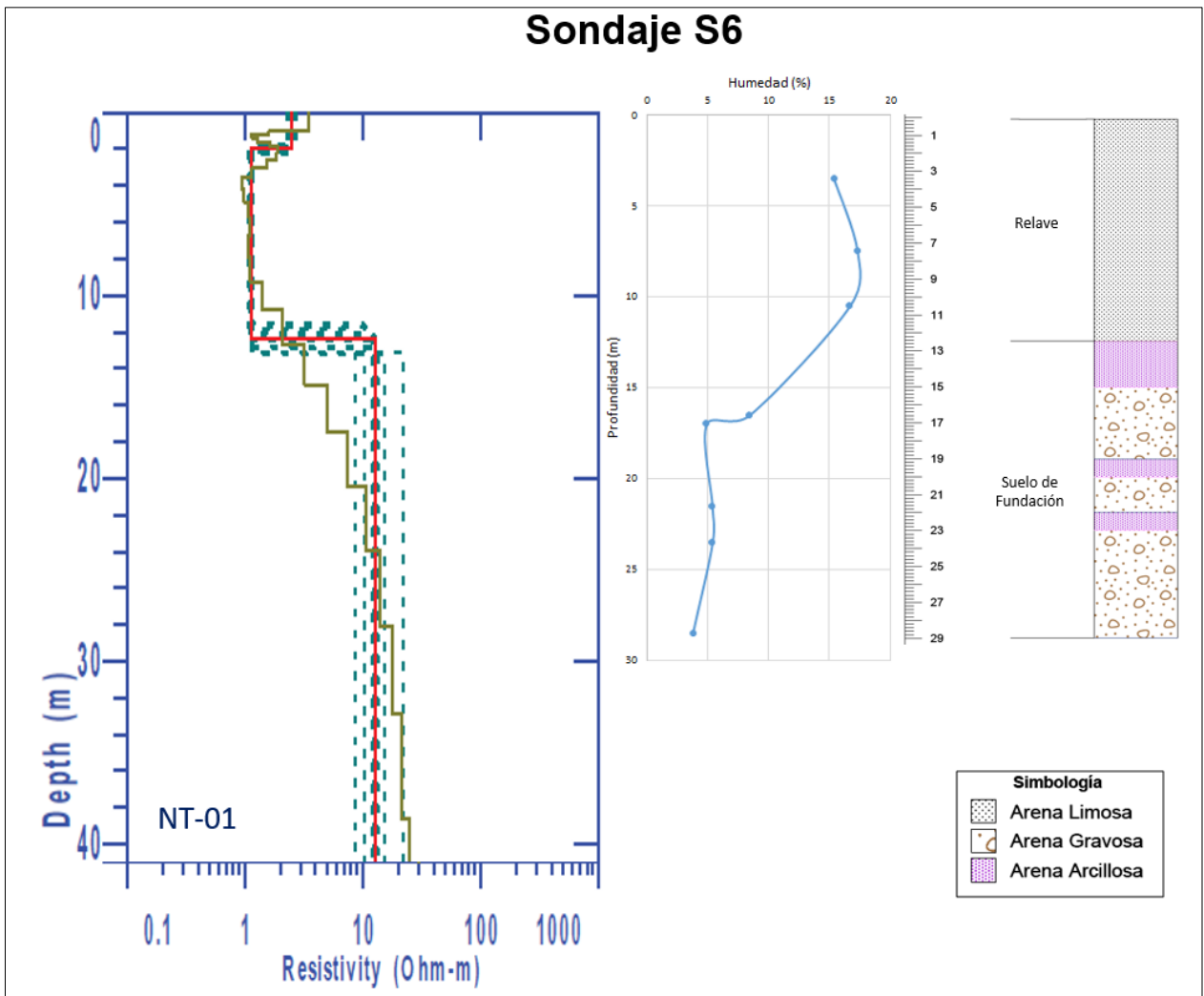


Figura 5-15: Correlación entre el NanoTEM NT-1 y la litología/humedad presente en el sondaje S6

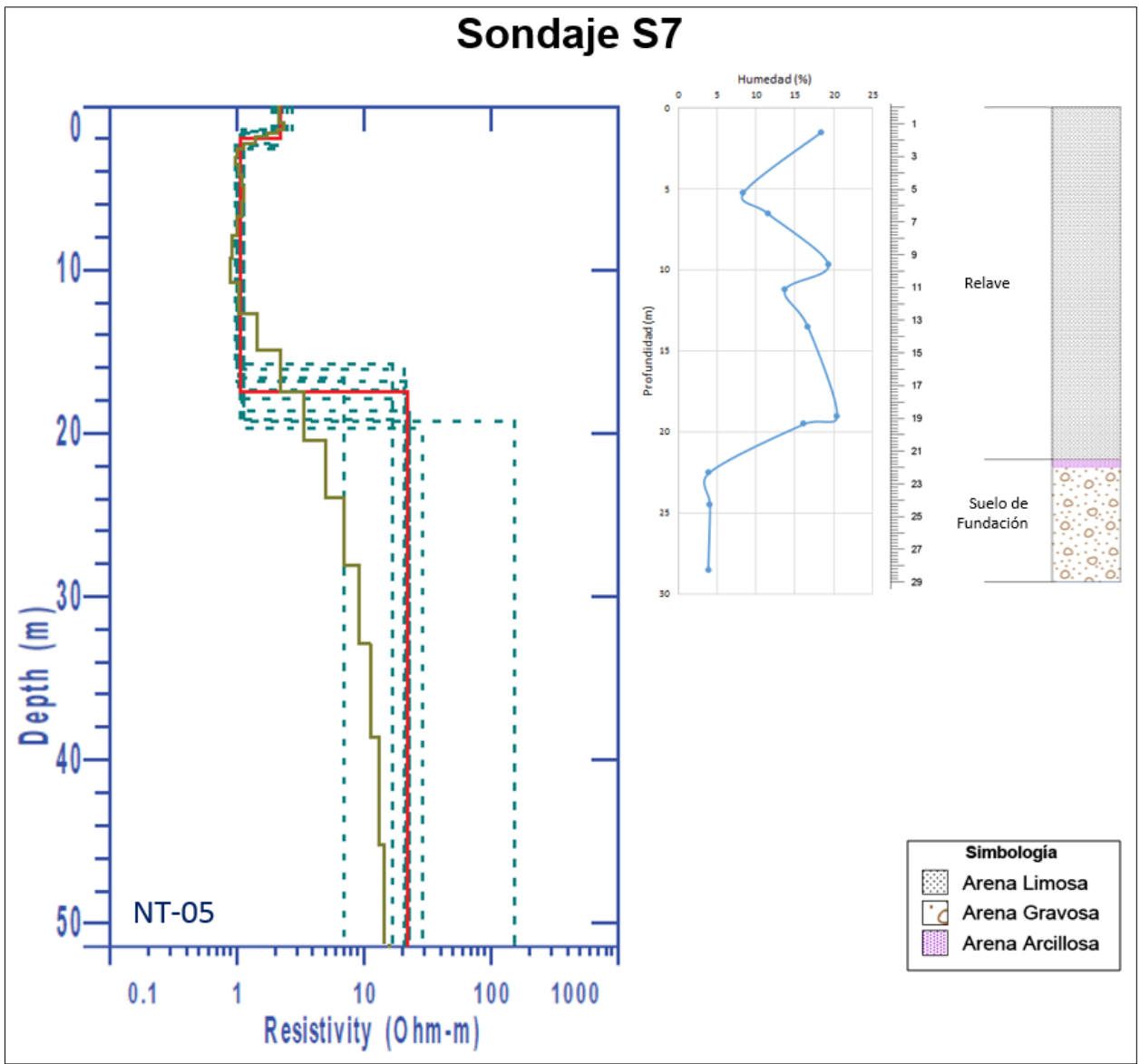


Figura 5-16: Correlación entre el NanoTEM NT-5 y la litología/humedad presente en el sondaje S7

6 MODELO NUMÉRICO

Una vez recopilada y analizada toda la información disponible gracias a i) los estudios geofísicos, ii) las descripciones y ensayos realizados en terreno y iii) los análisis de laboratorio, se busca reproducir el funcionamiento observado en el depósito de relaves y su condición actual mediante un modelo numérico.

Una vez calibrado el modelo, se construirán simulaciones predictivas, con el fin de evaluar la existencia y/o magnitud de la infiltración de humedad desde el relave hacia el sustrato natural. Lo anterior, considerando las posibles condiciones futuras del depósito, tanto en cuanto a su operación (secuencia de llenado) como a las condiciones del material depositado (contenido de sólidos).

El modelo numérico fue construido y reproducido en el software FEFLOW versión 6.2 (DHI-WASY GmbH, 2011), el cual soporta la simulación numérica de flujo en medios porosos saturados y parcialmente saturados utilizando una formulación de elementos finitos.

A continuación, se presentan las consideraciones para la construcción del modelo, su validación, los escenarios futuros y los resultados de las simulaciones.

6.1 Geometría y temporalidad

Se han considerado las características de la operación recibidas. Esto considera la Concentración de Partículas Sólidas (C_p), el volumen total depositado, el tiempo transcurrido desde el inicio de la operación y el tiempo de exposición a secado en cada sector. De esta forma, se han utilizado los siguientes supuestos para la calibración del modelo:

- C_p 62.31%, condición de depositación promedio del período de calibración.
- Espesor de relaves en depósito de 30 metros.
- Se aplica una depositación instantánea de capas de 20 cm, hasta completar los 30 metros.
- Cada capa es expuesta a radiación (secado) durante 9 días, completando un total de 1.350 días, congruente con el tiempo de operación hasta la fecha.
- Evaporación media de 9,1 mm/día.

El modelo fue en base a celdas de 10x10 cm. El ancho de la columna es de 1 m, ya que, dado el carácter unidimensional del modelo, asignarle un ancho mayor resultaría en un tiempo de cálculo innecesariamente mayor, lo cual demoraría la obtención de resultados tanto para la calibración como para las simulaciones.

Inicialmente se construyó la totalidad de la columna, esto es, 80 m de relave (espesor futuro máximo de las simulaciones) sobre un espesor conservador para el suelo natural (más de 100 metros), en caso de que los resultados indiquen una infiltración vertical de dicha magnitud.

La secuencia de llenado del depósito del depósito se reprodujo mediante la activación secuencial de las celdas que conforman las capas, las cuales entran al modelo completamente saturadas (como es el caso) y con los parámetros geotécnicos correspondientes al material de relave. En este momento, la parte superior del relave es expuesta a evaporación mediante la activación de un flujo hacia arriba aplicado a los nodos que configuran el techo de esta última capa depositada, durante el tiempo de secado escogido. Luego, una vez que se deposita la siguiente capa, se activan las nuevas celdas y la evaporación se aplica en los nuevos nodos superiores, y así sucesivamente.

6.2 Parametrización

Las Curvas Características de Retención de Humedad o 'CCRH' obtenidas para cada muestra, tanto en relave como suelo, se muestran en las Figuras Figura 6-1 y Figura 6-2. En base a ellas, se ha calculado una curva promedio que se considerará como representativa para ambos materiales.

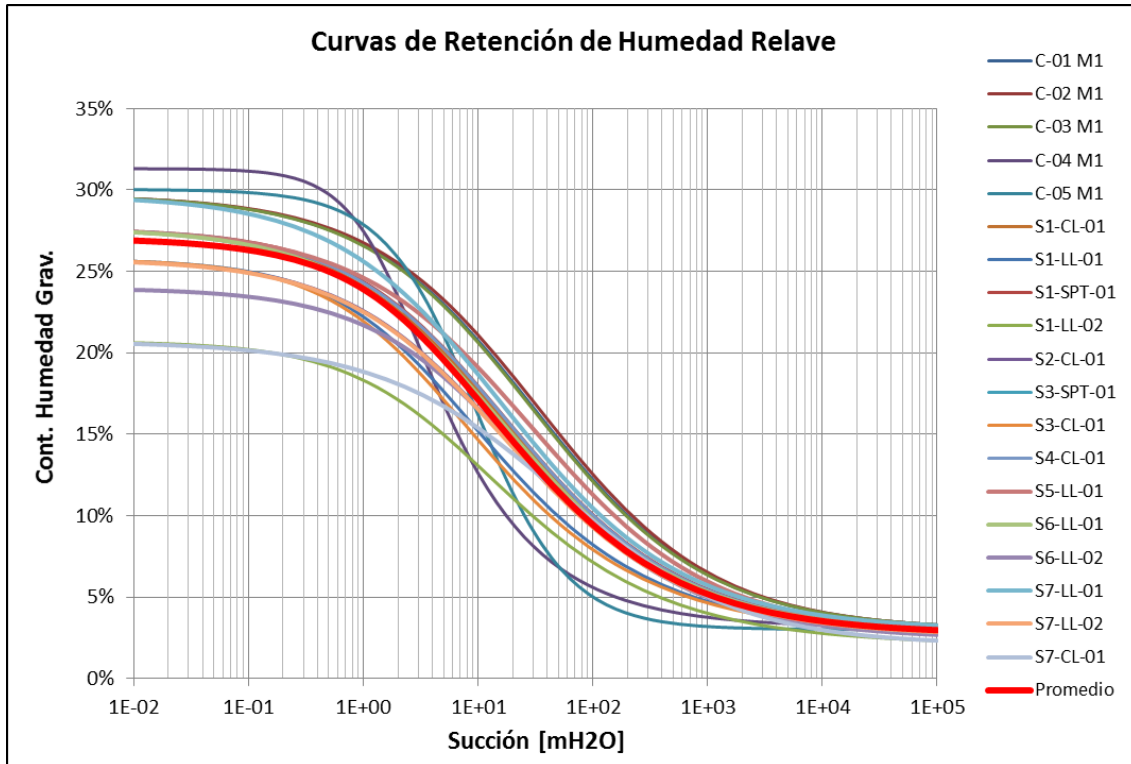


Figura 6-1: CRH muestras del material de Relave

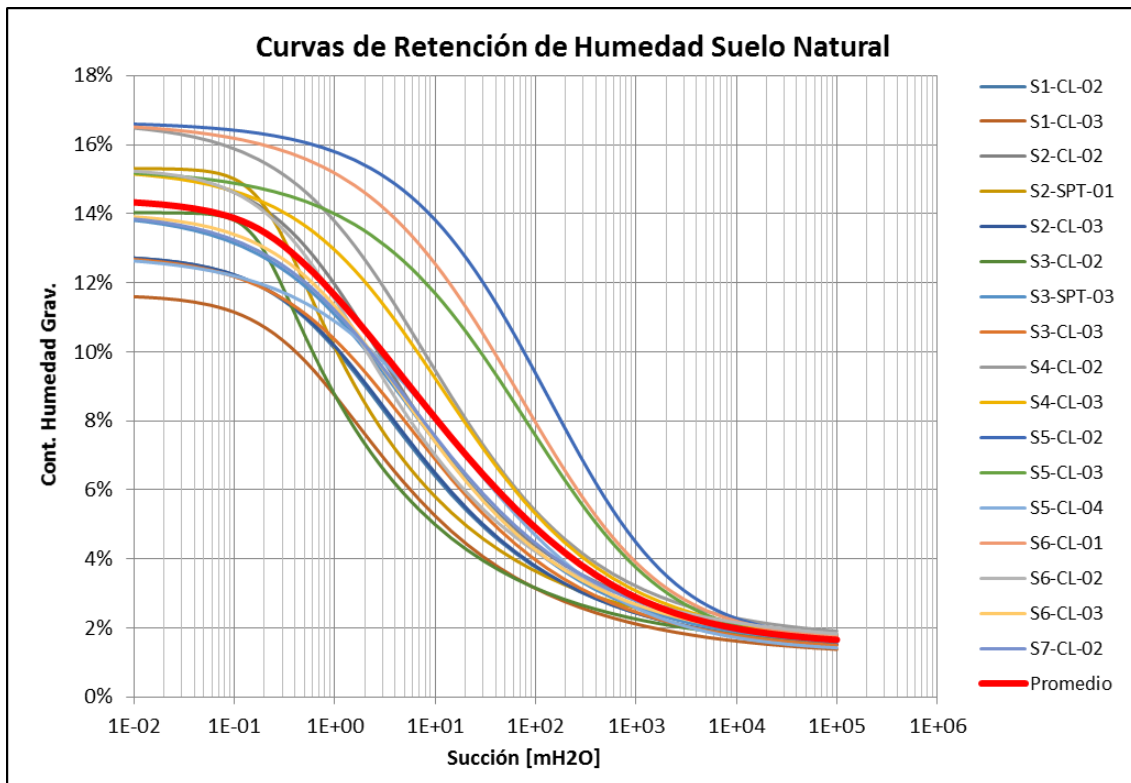


Figura 6-2: CRH muestras del material de Suelo

Luego, las CCRH representativas fueron aproximadas mediante un ajuste en base a los parámetros de Van Genuchten, calculando la saturación en base a la succión. El ajuste se realiza modificando las variables de la siguiente ecuación:

$$\theta_{VG} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m}$$

Donde θ_{VG} es la humedad volumétrica calculada de Van Genuchten, θ_r es la humedad residual, θ_s es la humedad saturada, α es un parámetro de escala inversamente proporcional al diámetro de poros promedio (m^{-1}), n y m son los parámetros de forma de la CRH ($m=1-1/n$, $0 < m < 1$) y h es el potencial de succión (mH_2O).

El ajuste obtenido para relave y suelo se muestra en la Figura 6-3. Los parámetros correspondientes a dichas curvas se presentan en la Tabla 6-1.

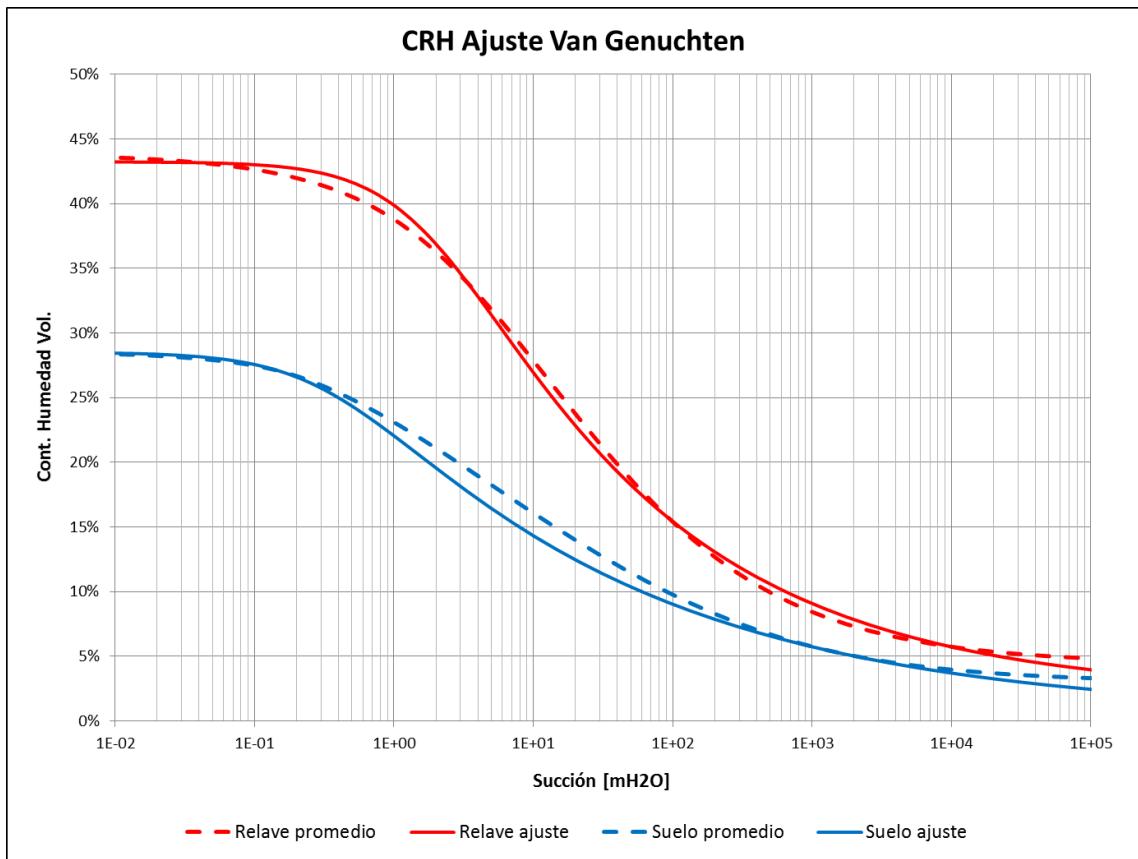


Figura 6-3: CRH obtenidas mediante parametrización en base a la ecuación de Van Genuchten

Tabla 6-1: Parámetros de Van Genuchten usados para el ajuste de las CRH

Parámetro	Relave	Suelo
α (1/m)	0,560	2,827
n	1,278	1,210
m	0,217	0,173
θ_r	0,020	0,004
θ_s	0,432	0,285

Luego, en base a los resultados obtenidos en laboratorio, se determinaron los parámetros geotécnicos característicos para el relave y el suelo natural, promediando dichos valores. Estos se presentan en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Parámetros geotécnicos de los materiales

Parámetro	Unidad	Relave	Suelo
Gravedad específica	[gr/cm ³]	2,83	2,80
Densidad Seca	[ton/m ³]	1,62	1,98
Porosidad	%	43,25	28,51
Conductividad Hidráulica	[cm/s]	5,07E-06	6,42E-04

En cuanto al contenido inicial de humedad gravimétrica, se ha calculado un 4,9% para el suelo de fundación, el cual representa las condiciones originales del suelo, previo a la depositación del relave. En el caso del relave, el contenido inicial de agua, es decir al momento de ser depositado, se calcula en base a su contenido de sólidos, mediante la siguiente fórmula:

$$w_g = \frac{(1 - C_p)}{C_p}$$

Donde w_g es el contenido volumétrico de agua y C_p es el contenido de sólidos. Para un C_p de 62,31%, este cálculo arroja una humedad gravimétrica de 60,49%. Luego, el contenido volumétrico se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$w_v = \rho_d w_g$$

Donde ρ_d corresponde a la densidad seca. Dado que esto arroja un porcentaje volumétrico de un 98%, es claro que el material del relave no es capaz de contener dicho volumen de agua, sino que se deposita con un exceso.

Ya que la porosidad del relave admite un máximo de 43,25% de contenido volumétrico de agua (completamente saturado), el agua restante se introduce al modelo como un flujo, el cual introduce dicho exceso al sistema a la tasa (mm/s) correspondiente, teniendo en cuenta la diferencia con la evaporación. Mientras mayor sea la exposición de la capa a secado, menor será dicho flujo, ya que la evaporación va cobrando mayor relevancia.

Esto se ilustra en la Tabla 6-3, en la cual, manteniendo la densidad seca y porosidad del relave constantes, se calcula el volumen de agua en exceso remanente de acuerdo a distintos tiempos de exposición a secado. Así, para un mismo contenido de sólidos de 62.31%, en aproximadamente 6 días, el exceso de agua se evaporaría completamente. Si bien esto es un análisis simplificado y no representa a cabalidad lo sucedido en la realidad, muestra a priori que el tiempo de exposición a secado constituye una variable relevante. Lo mismo se grafica en la Figura 6-4.

Tabla 6-3: Balance de aguas de acuerdo a las características del relave y al ciclo de secado

Cp	Densidad seca	Porosidad	w grav	w vol	Días de secado	Exceso de agua en capas de 10 cm	Agua evaporada (9,1 mm/d)	Volumen de agua remanente
	[ton/m3]				[d]	[m3]		
60	1.62	43.3%	67%	108%	1	0.065	0.009	0.056
60	1.62	43.25%	67%	108%	5	0.065	0.046	0.019
60	1.62	43.25%	67%	108%	10	0.065	0.091	-0.026
62.31	1.62	43.25%	60%	98%	1	0.055	0.009	0.046
62.31	1.62	43.25%	60%	98%	5	0.055	0.046	0.009
62.31	1.62	43.25%	60%	98%	10	0.055	0.091	-0.036
65	1.62	43.25%	54%	87%	1	0.044	0.009	0.035
65	1.62	43.25%	54%	87%	5	0.044	0.046	-0.002
65	1.62	43.25%	54%	87%	10	0.044	0.091	-0.047

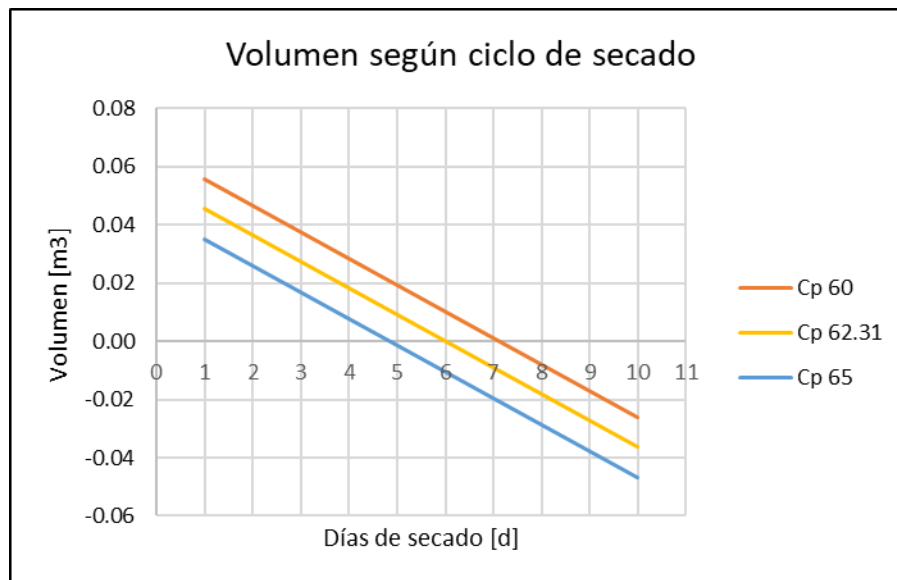


Figura 6-4: Volumen de agua remanente para distintos contenidos de sólidos y tiempos de secado

6.3 Validación del modelo

Dado que se cuenta con la medida de humedad al momento de la campaña de terreno (comienzos de 2016), el objetivo de la calibración es reproducir los valores medios medidos en relave y suelo natural. El espesor del relave se ha fijado en 30 metros, reflejando parte del avance que ha tenido el depósito desde la campaña de terreno hasta la fecha.

El sistema de funcionamiento del depósito registra el volumen total depositado (m3) en intervalos de tiempo en los distintos sectores, pero es poco realista obtener mediciones exactas del espesor depositado en el tiempo (espesor de cada capa).

Por lo anterior, una vez determinada la caracterización geotécnica obtenida luego de la campaña de terreno, se construyeron distintos escenarios de calibración en los cuales variaban el espesor de las capas depositadas y el tiempo que éstas eran expuestas a radiación.

En el caso del tiempo de secado, sí se cuenta con mediciones más precisas, con valores en torno a los 8-10 días.

Los resultados del modelo de calibración se presentan en la Figura 6-5, la cual muestra el contenido de humedad medido en cada uno de los sondajes y el perfil de humedad obtenido con la modelación.

En cuanto al perfil de contenido de humedad en profundidad, se ha escogido el sondaje S1 como el representativo del área; ya que se ubica en el sector más aguas abajo del depósito, presenta el mayor espesor, la humedad del suelo promedio más alta y se emplaza sobre una quebrada natural, que podría actuar como una vía preferencial de flujo de agua. Es decir, constituye el caso más desfavorable en cuanto a la potencial infiltración de agua desde el depósito de relaves.

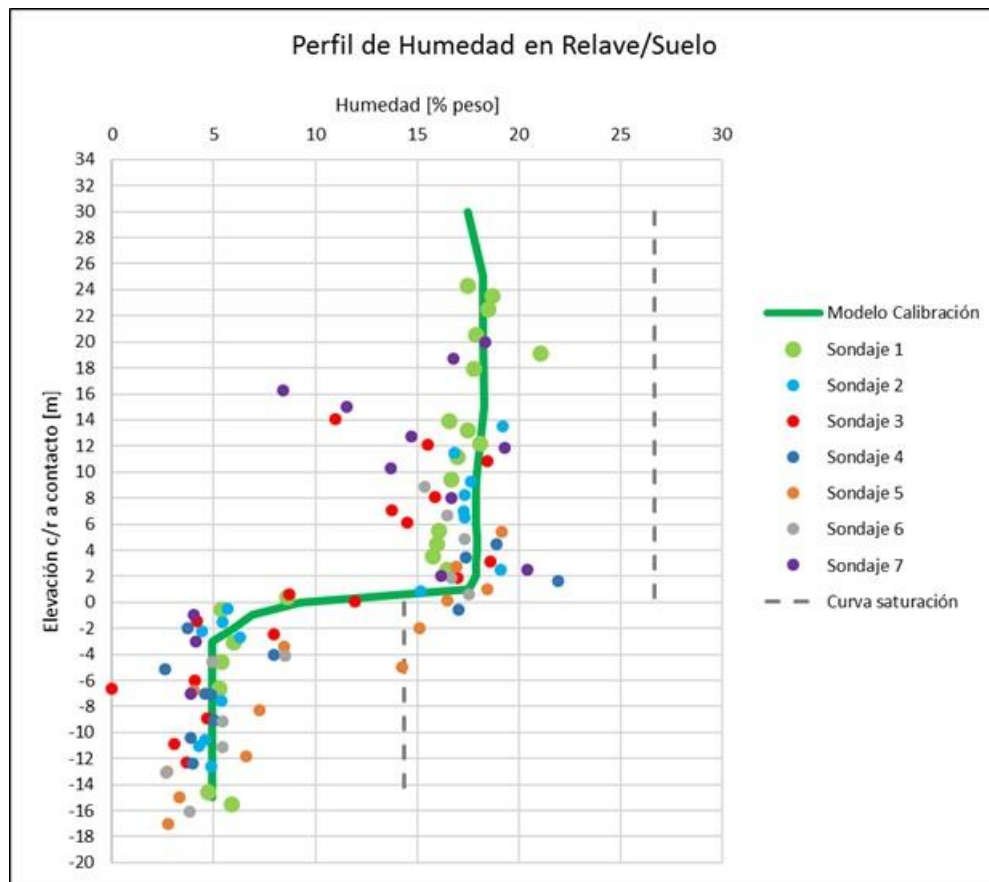


Figura 6-5: Humedad medida vs simulada

En la Figura 6-5 se observa que el perfil de humedad medido en el relave es reproducible mediante el modelo de calibración, (se logra un error menor al 5%), gracias a la exhaustiva caracterización de los materiales y a un modelo con un enfoque simple pero certero.

Las observaciones en terreno y los análisis de laboratorio apuntaron a un relave de características predominantemente homogéneas, lo cual facilita su representación a través de un modelo numérico. Esto, ya que no se hace necesario incluir heterogeneidades tales como variaciones litológicas y/o estructurales.

Es esperable que las mediciones de humedad sí tengan una mayor variación, ya que el depósito tiene distintos espesores en cada sector y sobreyace un terreno con una topografía y litología variable. Por lo anterior, la elección de un sondaje representativo que representara condiciones desfavorables permite

generar un modelo conservador que, en definitiva, tendrá el objetivo de entregar guías y recomendaciones que garanticen un funcionamiento seguro tanto operacional como medioambientalmente.

6.4 Simulación de condición futura

Para la simulación de escenarios futuros, se mantuvieron los parámetros geotécnicos resumidos en la Tabla 6-2. El contenido de sólidos (Cp), en tanto, se modificó, utilizando el valor de 65% que refleja la condición futura de la depositación del relave.

Debido a la relevancia que tiene la secuencia de llenado (espesor de capas, días de secado) en el perfil de humedad resultante, fue esta la que se varió para la construcción de los distintos escenarios de predicción.

La primera parte consistió en la construcción de escenarios que modelaran la depositación sobre el relave existente, es decir la columna representativa de 30 metros de espesor modelada durante la calibración, hasta completar 80 metros de espesor total. Los dos primeros escenarios (Modelos 1 y 2) mantuvieron un espesor de capas de 20 cm, las cuales fueron expuestas a secado durante 5 y 10 días. El Modelo 3 consideró un espesor de capas menor, de 10 cm, y 5 días de secado. Esto permitió comparar los escenarios 1 y 3, que operacionalmente toman el mismo tiempo, para analizar las implicancias de reducir los espesores vs. Aumentar los días de secado (análisis de sensibilidad).

Los siguientes escenarios tuvieron como objetivo simular la depositación de relave sobre suelo desnudo, es decir en nuevas locaciones. Como esta vez el contenido de sólidos será mayor (65%), es un ejercicio interesante para ver cómo influye dicha variable en el perfil de humedad obtenido y en la migración de humedad hacia el suelo natural. El primero de estos escenarios (Modelo 4) se construyó con capas de 50 cm y 15 días de secado, mientras que el Modelo 5 incluyó una secuencia variable: al inicio se depositaron capas de 1 m hasta completar 5 m, luego de lo cual se depositaron capas de 20 cm, ambas con 10 días de secado. El Modelo 6 utilizó capas de 20 cm y 10 días de secado. Todos los escenarios de depositación sobre suelo desnudo tienen un espesor total de 30 m de relave.

Las características de cada escenario se resumen en la Tabla 6-4. Las Figura 6-6 y Figura 6-7 Figura 6-7 grafican el perfil de contenido de humedad en profundidad para los escenarios de depositación sobre relave y sobre suelo desnudo, respectivamente. Además de la humedad proyectada hasta la depositación de la última capa de relave, se presenta el resultado luego de 10 años de depositado todo el relave, exponiendo a evaporación la capa más superficial, pero deteniendo la adición de más capas. La Tabla 6-5 contiene el resultado de las simulaciones en detalle.

Tabla 6-4: Características de cada escenario de simulación

Lugar depositación	Esc	Cp	Días secado	Espeor capas	Altura total	Exceso agua	Elementos por capa	N° capas	Fin depositación	+10 años
				[cm]	[m]	[cm]			[d]	
Calibración	0	62,31	9	20	30	10,95	20	150	1350	5000
Sobre relave existente	1	65	10	20	80	8,80	20	250	2500	6150
	2	65	5	20	80	8,80	20	250	1250	4900
	3	65	5	10	80	4,40	10	500	2500	6150
Sobre suelo	4	65	15	50	30	21,99	50	60	900	4565
	5	65	10	100 - 20	30	43,98 – 8,80	100 - 20	130	1300	4950
	6	65	10	20	30	8,80	20	150	1500	5150

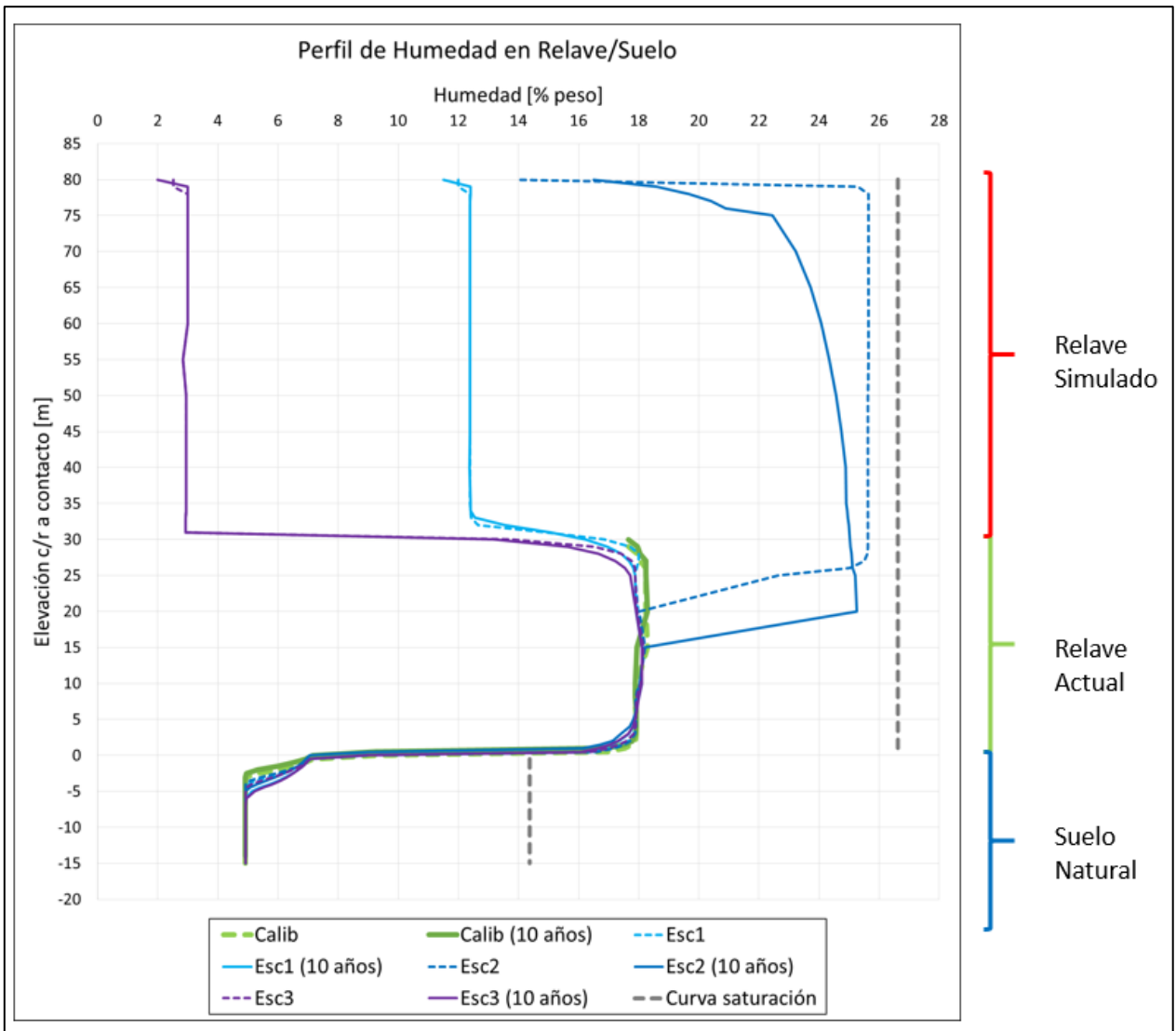


Figura 6-6: Perfil de contenido de humedad, escenarios depositados sobre relave.

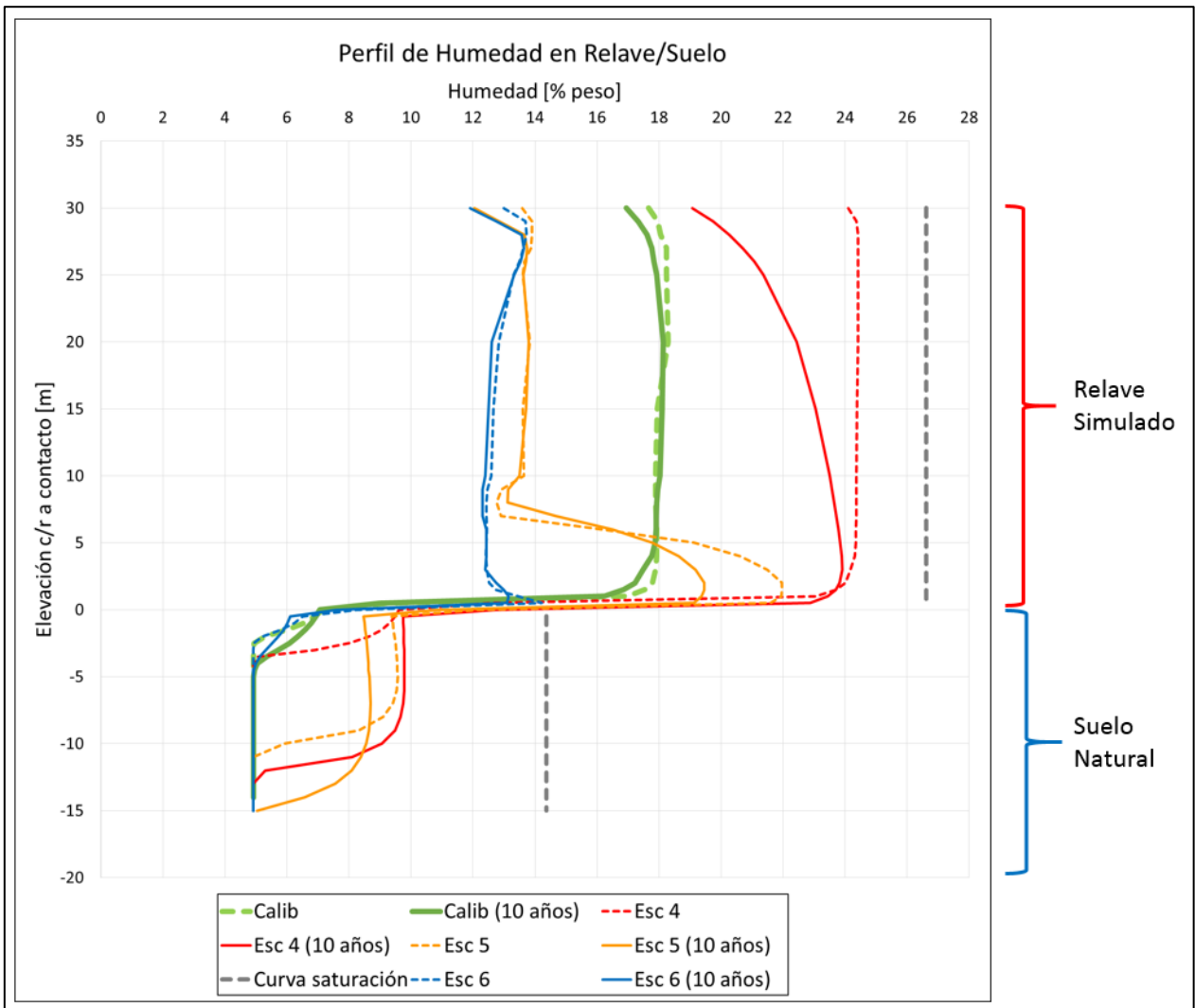


Figura 6-7: Perfil de contenido de humedad, escenarios depositados sobre suelo desnudo

Tabla 6-5: Humedad gravimétrica obtenida en cada simulación cada 1-5 metros

Elevación c/r a contacto	% Humedad gravimétrica													
	Calib		Esc1		Esc2		Esc3		Esc4		Esc5		Esc6	
	20cm	9d	20cm	10d	20cm	5d	10cm	5d	50cm	15d	100- 20cm	10d	20cm	10d
[m]	Fin	+10 años	Fin	+10 años	Fin	+10 años	Fin	+10 años	Fin	+10 años	Fin	+10 años	Fin	+10 años
80			12,00	11,50	24,90	16,10	2,52	2,00						
75			12,39	12,40	25,65	20,89	3,00	3,00						
70			12,39	12,40	25,65	22,45	3,00	3,00						
65			12,39	12,40	25,65	23,22	3,00	3,00						
60			12,39	12,40	25,65	23,72	3,00	3,00						
55			12,39	12,40	25,64	24,08	2,84	2,84						
50			12,39	12,40	25,64	24,35	2,95	2,95						
45			12,39	12,40	25,63	24,56	2,95	2,95						
40			12,38	12,38	25,64	24,74	2,95	2,95						
35			12,39	12,40	25,63	24,89	2,95	2,95						
34			12,41	12,41	25,63	24,91	2,95	2,95						
33			12,43	12,54	25,64	24,94	2,93	2,93						
32			12,65	13,53	25,64	24,96	2,93	2,93						
31			14,92	15,08	25,64	24,99	2,93	2,93						
30	17,50	16,53	16,86	16,23	25,64	25,01	13,74	13,17	23,80	19,07	13,58	12,04	13,00	11,91
25	18,24	17,83	17,88	17,87	22,64	25,12	17,87	17,71	24,41	21,37	13,60	13,62	13,30	13,32
20	18,24	17,93	17,98	17,92	18,02	25,21	17,96	17,92	24,41	22,43	13,83	13,80	12,84	12,60
15	18,29	18,14	18,18	18,12	18,21	25,26	18,16	18,11	24,41	23,06	13,60	13,72	12,65	12,50
10	17,94	18,09	18,06	18,11	18,03	18,16	18,07	18,11	24,37	23,50	13,64	13,50	12,59	12,40
9	17,90	18,02	17,97	18,06	17,94	18,05	17,99	18,06	24,37	23,57	12,93	13,12	12,46	12,30
8	17,89	17,96	17,92	18,00	17,90	17,99	17,94	18,01	24,36	23,64	12,77	13,11	12,43	12,30
7	17,89	17,93	17,90	17,96	17,90	17,95	17,91	17,97	24,36	23,71	12,90	14,68	12,43	12,30
6	17,91	17,91	17,91	17,92	17,91	17,92	17,91	17,93	24,36	23,78	16,20	16,51	12,44	12,44
5	17,93	17,90	17,91	17,89	17,92	17,89	17,91	17,88	24,35	23,84	19,12	17,78	12,44	12,43
4	17,93	17,86	17,91	17,82	17,92	17,83	17,89	17,80	24,34	23,88	20,62	18,63	12,42	12,43
3	17,92	17,76	17,85	17,67	17,88	17,70	17,82	17,65	24,31	23,90	21,49	19,18	12,44	12,40
2	17,88	17,49	17,65	17,36	17,73	17,40	17,59	17,32	24,18	23,82	21,96	19,45	12,53	12,75
1	17,55	16,85	17,07	16,70	17,19	16,74	16,98	16,66	23,70	23,43	21,94	19,37	13,47	13,15
0	9,25	8,99	9,05	8,95	9,09	8,96	9,02	8,95	12,64	12,72	12,14	10,85	8,25	7,58
-1	6,90	6,93	6,92	6,95	6,92	6,94	6,92	6,95	9,49	9,76	9,41	8,50	6,24	6,01
-2	6,00	6,59	6,45	6,67	6,37	6,65	6,51	6,69	9,05	9,77	9,47	8,55	5,21	5,73
-3	4,95	6,07	5,70	6,27	5,47	6,22	5,86	6,32	8,02	9,78	9,52	8,60	4,91	5,32
-4	4,91	5,37	4,99	5,72	4,93	5,62	5,10	5,81	5,07	9,79	9,56	8,64	4,91	4,99
-5	4,91	4,95	4,91	5,14	4,91	5,06	4,92	5,22	4,91	9,79	9,58	8,67	4,91	4,92
-6	4,91	4,92	4,91	4,93	4,91	4,92	4,91	4,95	4,91	9,78	9,54	8,69	4,91	4,91
-7	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,92	4,91	9,75	9,42	8,70	4,91	4,91
-8	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	9,67	9,10	8,69	4,91	4,91
-9	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	9,48	8,31	8,64	4,91	4,91
-10	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	9,07	5,92	8,55	4,91	4,91
-11	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	8,11	4,91	8,38	4,91	4,91
-12	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	5,30	4,91	8,08	4,91	4,91
-13	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	7,56	4,91	4,91
-14	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	6,58	4,91	4,91
-15	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	5,04	4,91	4,91

Otro aspecto importante a considerar al momento de evaluar cada escenario de simulación, es la profundidad alcanzada por la infiltración de humedad en el suelo de fundación, es decir hasta qué profundidad se ve afectada la humedad natural de éste. La Tabla 6-6 detalla estos resultados, tanto una vez finalizada la depositación del relave como 10 años más tarde.

Tabla 6-6: Profundidad de propagación de humedad

Propagación de humedad en profundidad (suelo natural)		
Escenario	Fin depositación	+10 años
	[m]	
0	-3,5	-6
1	-4,5	-6
2	-4,5	-6
3	-5	-7
4	-4	-12
5	-10	-15
6	-3	-6

6.4.1 Análisis de resultados de simulación predictiva

Analizando los resultados de los escenarios depositados sobre el relave existente (1, 2 y 3), se aprecia la importancia que tiene la secuencia de depositación en los resultados obtenidos. Comparando los escenarios 1 y 3, vemos cómo, para tiempos operacionales de la misma duración total, reducir el espesor de las capas (escenario 3) presenta una disminución de la humedad considerablemente mayor que aumentar los días de secado (escenario 1). Esto tiene sentido, ya que, en capas más delgadas, la evaporación logra actuar en un mayor porcentaje de éstas, mientras que la evaporación en capas más gruesas se verá limitada a la porción superior de las mismas.

Una secuencia apropiada puede incluso contrapesar las dificultades operacionales a la hora de reducir el contenido de sólidos, como ha sido el caso del relave actual, el cual pese a operar en torno a un Cp de 62,31% no ha propagado la humedad más allá de 3-4 metros de profundidad en el suelo.

En los escenarios depositados sobre el relave existente, la propagación de humedad nunca supera los 7 m de profundidad, incluso transcurridos 10 años. La baja permeabilidad del suelo impide que la humedad descienda libremente, e incluso cuando penetra hacia el suelo, éste nunca se satura lo suficiente como para generar flujos (lo cual sucede en torno al 90% de saturación, lo que en el suelo correspondería a un 12,9% gravimétrico).

En los escenarios 4 y 5, que simulan una depositación sobre suelo desnudo con características más pesimistas que el escenario de calibración, se alcanzan profundidades de propagación mayores.

En el escenario 6, en tanto, que mantiene el espesor de capas de la calibración y aumenta tanto los días de secado como el contenido de sólidos, se observa un relave con un contenido de humedad promedio

menor (12,5% vs 17,9%). Si bien la profundidad de afectación de humedad es similar en este escenario y en la calibración, la humedad máxima alcanzada por el suelo es menor en el escenario 6 (6,1% vs 7,1%).

En el caso más desfavorable de depositación sobre suelo (escenario 4), el contenido de humedad máximo alcanzado por el suelo es de un 9,8% gravimétrico, correspondiente al 68% de saturación, y esto sólo hasta los 5 metros de profundidad.

El escenario 2, el cual se construyó con espesores de 20 cm y tan sólo 5 días de secado, es el caso más desfavorable de depositación sobre relave. Aquí se observa cómo la humedad extra se propaga en profundidad, llegando a afectar el contenido del relave subyacente hasta alrededor de 15 m, pero sin llegar al suelo. Se considera que el caso más desfavorable corresponde al N°4, pues el escenario 2, a pesar de tener un relave con una humedad mayor al 24% (al depositar la última capa), a los 10 años no alcanza a afectar más allá de los 12 m de profundidad en el suelo. La situación presentada en estos escenarios no se acerca a la operación actual o proyectada, por lo que constituyen simulaciones de casos extremadamente desfavorables.

De las simulaciones sobre suelo desnudo, en tanto, se extrae que con espesores de 50 cm las capas no logran secarse lo suficiente, incluso expuestas durante 15 días a evaporación. Esto se encuentra estrechamente relacionado a la discutido anteriormente sobre la importancia de depositar capas delgadas vs. dejarlas secar más días. En tanto, de mantener un espesor de capas de 20 cm y aumentar el contenido de sólidos a 65% (escenario 6), se espera una disminución del contenido de humedad tanto del relave como del suelo.

El escenario 5, por su parte, simula una situación muy desfavorable al comienzo (capas de 1 m), para luego operar en condiciones más seguras (capas de 20 cm). Se ve cómo a los 10 años la humedad del relave en sus capas más profundas se acerca a la actual (en torno al 18% gravimétrico), por lo que se esperaría que la propagación de humedad se reduzca considerablemente, tal como se da hoy en día. Prácticamente toda la humedad propagada inicialmente hacia el suelo en este escenario corresponde al exceso generado por la depositación de las primeras capas, para luego verse drásticamente reducida al disminuir los espesores.

La profundidad de agua subterránea subyacente al depósito de relave fue estimada durante la campaña de terreno realizada a comienzos de 2016, determinando que se encuentra a un mínimo de 50 metros, que corresponde a la profundidad máxima alcanzada por los sondajes, en los cuales no se alcanzó el nivel freático. Estudios anteriores han llegado a estimar profundidades superiores a los 200 metros. En todos los escenarios, incluso transcurridos 10 años desde su depositación final y en los casos más pesimistas, la propagación de humedad se encuentra siempre muy por sobre estos niveles.

7 DISCUSIÓN

7.1 Obtención de datos de terreno

Durante la campaña de terreno, es fundamental seguir los protocolos y tener los cuidados necesarios para obtener mediciones y muestras que representen de forma precisa la situación actual del depósito de relaves y del suelo subyacente. Una buena ejecución permitirá reflejar fielmente las propiedades de los materiales, lo cual se traducirá en un modelo más fiel a la realidad y, por tanto, en una herramienta válida para, en este caso, evaluar la infiltración de agua al subsuelo.

En este contexto, la perforación sónica fue fundamental, ya que permitió recuperar los testigos de forma intacta y con su contenido de humedad inalterado. Esto permitió la realización de ensayos de laboratorio no sólo para muestras obtenidas en calicatas en los primeros metros del depósito, sino que también se pudo medir la humedad del suelo subyacente, pudiendo evaluar fielmente la condición de éste posterior a la depositación del relave.

La utilización de múltiples herramientas (mediciones in-situ, ensayos de laboratorio y geofísica) entrega un gran valor, tanto para la interpretación conceptual como para el modelo numérico. Se caracterizó al depósito de forma integral, y esto facilitó la determinación de una columna característica a ser utilizada para la modelación, lo cual también se debió a la baja heterogeneidad de éste.

7.2 Dimensionalidad del modelo numérico

En el presente estudio se decidió implementar un modelo en una dimensión, lo cual presenta tanto ventajas como limitaciones.

Por un lado, de tratarse de un medio muy heterogéneo, se hace difícil representarlo con una única columna representativa. En caso de, aun así, implementar una modelación unidimensional, se debería considerar la construcción de distintas columnas que sean representativas de los distintos sectores del medio a evaluar.

Si el medio presenta heterogeneidades en el eje horizontal de relevancia hidrogeológica, tales como estructuras o pendientes, se hace necesaria la construcción de al menos modelos bidimensionales, dependiendo de la complejidad del medio.

La elección de dimensionalidad está a su vez sujeta a los objetivos planteados para el modelo. En este caso, se deseaba estudiar la posible infiltración vertical de flujos aportados por el depósito de relaves, por lo que no fue necesaria la construcción de modelos más complejos. Si se desea evaluar la eficacia de un dren cortafugas bajo un muro o de pozos de extracción aguas abajo, se debe plantear un modelo 2D. Si el depósito se encuentra en una cuenca que pueda concentrar todo o gran parte del flujo por quebradas con material de alta permeabilidad, entonces se debería considerar un modelo 3D.

Finalmente, debe tenerse en cuenta la creciente complejidad al ejecutar modelos en más dimensiones, especialmente en medios parcialmente saturados. Modelos de una dimensión, si bien no cuentan con las ventajas de los de 2 o 3 dimensiones, tardan menos en su construcción y ejecución, y permiten refinar la malla sin llegar a una cantidad muy alta de elementos/nodos que dificulten los cálculos para el software.

7.3 Modelación de medios parcialmente saturados

Hoy en día, gracias a los avances tanto de hardware como de software, se ha hecho posible representar medios parcialmente saturados cada vez más complejos y fieles a la realidad. En años anteriores, ciertos problemas parcialmente saturados debían enfrentarse como si fuesen medios saturados, ya que las herramientas existentes eran limitadas.

Gracias a estos avances, hoy es posible construir modelos complejos que antes eran impensados. En el caso concreto de evaluación hidrogeológica de depósitos de relaves, el enfoque era el de obtener caudales de flujo saturado desde el depósito hacia el suelo en estado estacionario, para luego diseñar medidas que mitigaran dichos flujos.

Así mismo, para modelar el crecimiento del relave era necesario construir un modelo para cada capa nueva que se depositaba, mientras que hoy es posible activar las nuevas capas de forma automática mediante *time-series*. Esta herramienta también permite la implementación de propiedades materiales transientes, es decir variables en el tiempo, como sería la disminución de la permeabilidad de un depósito a medida que se compacta durante su crecimiento.

Es de esperar que, con futuros avances tecnológicos, la evaluación de medios parcialmente saturados sea tan aplicable como lo es hoy la modelación saturada.

7.4 Resultados de terreno vs. Modelo numérico

Contar con una exhaustiva caracterización del depósito permitió la construcción de un modelo numérico fiel a la realidad, que pudo calibrarse con datos precisos y fehacientes. Esto se vio reflejado en los resultados de la calibración, con la cual se obtuvo un perfil de humedad con un error muy bajo. Esto entrega una mayor certeza a la hora de emplear el modelo como herramienta predictiva, lo que permite una planificación y diseño que garantice un funcionamiento operacionalmente viable que a su vez minimice los impactos al medio ambiente.

Si bien la infiltración actual podía ser evaluada únicamente con lo obtenido en terreno, la modelación actúa como un respaldo y permite la evaluación de las distintas variables que actúan en el comportamiento del medio, tales como la permeabilidad, tiempo de exposición a secado, espesor de las capas, etc.

Cada estudio de este tipo aporta, además, al futuro entendimiento de este tipo de problemas, para que el enfoque se ajuste a los objetivos buscados y se emplee una metodología efectiva, que integre métodos numéricos a los análisis prácticos.

7.5 Limitaciones del modelo numérico

En primer lugar, como se ha mencionado anteriormente, los modelos en 1D de este tipo se encuentran restringidos a flujos verticales, y no consideran posibles desplazamientos laterales facilitados por heterogeneidades o gradientes de flujo. Esto implica que no se representan flujos hacia el entorno del depósito, sino exclusivamente hacia el subsuelo. Como en el presente estudio el flujo hacia el subsuelo fue muy bajo, no fue necesario el paso a 2D para evaluar esto.

Así mismo, no se consideran posibles aportes desde el resto del depósito, como podría suceder en el caso de que se formen lagunas, bajo las cuales el depósito se vería sujeto a una carga hidráulica constante que podría mantenerlo saturado y aumentar la tasa de infiltración hacia el suelo. Como el depósito de relaves estudiado no ha presentado fenómenos similares durante su operación, no fue necesario considerar este aspecto. Esto es lo esperado en un depósito de relaves espesado, al menos una vez superada la etapa de *ramp-up*, durante la cual las condiciones pueden ser más desfavorables (menor contenido de sólidos, crecimiento acelerado, concentración de material en quebradas).

La representación del agua excedente aportada por el relave se hizo mediante un flujo, el cual durante un tiempo determinado ingresaba dicho exceso al sistema de forma directa, considerando la evaporación. Este es un enfoque conservador, ya que en la realidad esta agua no percolará en su totalidad. Parte de ésta escurrirá hacia zonas más bajas, o permanecerá expuesta a evaporación durante un tiempo mayor. De esta forma se garantiza un escenario pesimista, en línea con objetivos ambientales.

Por otro lado, la evaporación también es representada como un flujo de salida, aplicado a los nodos superiores del depósito. Una mejor representación se lograría aplicando una profundidad de extinción, ya que, si los nodos superiores se encuentran con un bajo contenido de humedad, la evaporación será poco efectiva aun cuando los nodos inferiores pudiesen tener una humedad mayor.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En vista de los resultados del presente estudio, se desprenden las siguientes observaciones:

- La modelación numérica es una valiosa herramienta de validación y predicción, siempre y cuando se cuente con mediciones en terreno y de laboratorio que entreguen una caracterización exhaustiva del medio estudiado.
- A la hora de plantear un modelo numérico, se debe tener en cuenta el objetivo buscado por éste; ya que de esto dependerá la información requerida, la dimensionalidad, los tiempos y la aplicabilidad de los resultados obtenidos.
- La modelación numérica en 1D es adecuada en medios relativamente homogéneos. En medios más complejos, y dependiendo del objetivo, puede ser necesario un análisis en 2 o 3 dimensiones.
- En vista de los escenarios de simulación, se aconseja siempre priorizar una depositación gradual, la cual permita exponer las capas de relave a evaporación el tiempo necesario para su secado, de acuerdo a su contenido de sólidos. Esto minimizará la infiltración de humedad hacia el suelo subyacente, eliminando la posible contaminación de acuíferos subterráneos.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Meggyes, T. & Debreczeni, Á. (2006). Paste technology for tailings management. *Land Contamination & Reclamation*, 14 (4).
- Watson, A. (2010). Alternative tailing disposal – fact and fiction. *International Mining*, Abril 2010, pp. 3-6.
- Valdebenito, R. (2007). Depósitos de Relaves Espesados y en Pasta. *VST Ingenieros, SUSTENTARE, Santiago*, Julio 2007.
- Terzhagi, K. & Peck, R. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- Moehlis, J. M. (2001). Solution of the Diffusion Equation by Finite Differences. <https://me.ucsb.edu/~moehlis/APC591/tutorials/tutorial5/node3.html>
- Finite Element Mesh Refinement. <https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement>
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*.
- Fredlund, D.G. & Xing, A. & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.
- Wang, C. & Menzies, B. (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*.
- Tindall, J. & Kunkel, J. (1999). *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*.
- Robinsky, E. (1999). *Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry. Quebecor Printpak, 1999*.
- Jewell, R.J. & Fourie, A.B. (2002). *Paste and Thickened Tailings – A Guide. Australian Centre for Geomechanics, Second Edition*.
- SEA (2012). *Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA*.
- AMSA (2011). *Mapa geológico, escala 1:25.000 (Mpodozis et al., 2011)*.
- SRK Consulting (2007). *Estudio Hidrológico e Hidrogeológico Proyecto Esperanza*.
- SRK Consulting (2012). *Estudio Infiltración de Relaves Minera Esperanza*.
- GEODATOS (2012). *Estudio Geofísico GEM2 y NanoTEM Proyecto Infiltración Tranque Relaves Minera Esperanza*.