

MÁS ALLÁ DE LA GEOTECNIA: LA DIMENSIÓN GEOGRÁFICA Y TERRITORIAL DEL NIVEL FREÁTICO EN DEPÓSITOS DE RELAVES

Integración de la Geografía Física, Hidrogeología y Modelación de Riesgo en la Gestión de Depósitos Mineros

Magdalena Severino Guzmán

Geógrafa & Especialista en Hidrogeología, Universidad de Chile | Área de Análisis Territorial y Medio Ambiente, Mercator Ingenieros

RESUMEN

¿Es la línea freática de un depósito de relaves solo un parámetro más dentro de un software de estabilidad de taludes? ¿O es, en realidad, la frontera viva entre la operación minera y la cuenca que la contiene? La respuesta condiciona cómo diseñamos, monitoreamos y gobernamos estos depósitos. Cuando el nivel freático se trata únicamente como un input geotécnico, se pierde de vista que su posición y comportamiento son el resultado de procesos que ocurren a escala de cuenca: el clima, la geomorfología del emplazamiento, la geología de la fundación y su conexión con los acuíferos aluviales que, aguas abajo, abastecen a comunidades rurales. Este artículo propone leer el nivel freático no como un número aislado, sino como una variable territorial que articula seguridad geotécnica, protección de recursos hídricos y sustentabilidad del entorno.

1. EL RIESGO INTEGRADO: DOS LECTURAS DE UN MISMO FENÓMENO

Dentro del muro y la cubeta, el agua gobierna la resistencia mecánica del material a través del principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi: $\sigma' = \sigma - u$

Un incremento de la presión de poros (u) reduce el esfuerzo efectivo (σ') disponible para resistir el corte, según la relación fundamental: $\tau = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi'$

En relaves saturados y de granulometría fina, este mecanismo es la puerta de entrada a la licuación estática o dinámica: la pérdida súbita de resistencia sin que medie necesariamente un sismo. Es, en esencia, el riesgo interno del depósito.

Perspectiva Territorial y Ambiental - Hacia Afuera

Pero existe un riesgo simétrico "hacia afuera", que rara vez recibe el mismo nivel de atención:

- **Capacidad de Almacenamiento:** La capacidad real de almacenamiento depende de cuánta agua se infiltra hacia la fundación y no queda disponible en superficie, alterando los balances de diseño.
- **Percolación y Despiche:** La salida no controlada de agua a través del muro o su fundación representa una vía directa de pérdida de contención, con implicancias tanto geotécnicas como ambientales.
- **Conexión con Acuíferos y APR:** Cuando la fundación del depósito está en contacto hidráulico con un acuífero aluvial, cualquier alteración de calidad o cantidad de agua en el depósito puede propagarse aguas abajo hasta Captaciones de Agua Potable Rural (APR), comprometiendo el suministro de comunidades que dependen de ese mismo sistema hídrico.

La línea freática no separa un problema geotécnico de un problema ambiental; es el mismo fenómeno físico observado desde dos escalas distintas.

En Chile, esta mirada integrada no es solo una buena práctica: es una exigencia regulatoria. El **Decreto Supremo N°248**, del Ministerio de Minería, exige monitoreo geotécnico e hidrogeológico de los depósitos de relaves a lo largo de todo su ciclo de vida, mientras que el **Estándar Global de la Industria para la Gestión de Relaves (GISTM)** eleva ese estándar a nivel de gobernanza corporativa y transparencia internacional.

2. FACTORES GEOGRÁFICOS E HIDROGEOLÓGICOS GOBERNANTES

La posición del nivel freático no puede entenderse sin leer el territorio en el que el depósito se emplaza una lectura particularmente crítica en las cuencas semiáridas de la vertiente andina donde se concentra buena parte de la gran minería chilena:

Dimensión Geográfica	Proceso e interacción en la cuenca	Efecto en la Línea Freática
Geomorfología y Emplazamiento	Forma del valle o quebrada (ancho, pendiente y grado de confinamiento topográfico).	Determina las vías naturales de escurrimiento superficial y subterráneo, identificando los puntos de mayor vulnerabilidad hidráulica.
Segregación Granulométrica	Decantación diferenciada: arenas de alta conductividad hacia el muro y lamas de baja permeabilidad en la cubeta.	Genera una severa anisotropía y heterogeneidad que condiciona la geometría real de la línea freática.
Clima y Eventos Extremos	Precipitaciones intensas y de baja frecuencia en cuencas semiáridas.	Satura rápidamente la zona no saturada (vadosa), reduciendo la amortiguación e induciendo ascensos repentinos del nivel freático.
Conectividad Hidrogeológica	Continuidad hidráulica entre la base permeable del depósito y el acuífero aluvial regional.	Define si una alteración permanece como un fenómeno local o evoluciona a un impacto a escala de cuenca.

3. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO Y MODELACIÓN NUMÉRICA

El cálculo de la línea freática ha evolucionado desde soluciones conceptuales simples hacia representaciones cada vez más fieles de la heterogeneidad real del territorio:

- **Ley de Darcy y Solución Dupuit-Casagrande:** Describe el flujo en medios porosos ($q = -K \cdot dh/dx$). Útil como primera aproximación rápida de la geometría de la línea freática en un talud homogéneo, aunque limitada frente a depósitos con fuerte anisotropía.
- **Modelación Numérica en Elementos Finitos (Richards):** Resuelve el flujo saturado y no saturado mediante la ecuación de Richards, capturando la variación temporal del contenido de humedad y la presión de succión en la zona vadosa: $\partial\theta / \partial t = \nabla \cdot [K(\psi) \cdot \nabla(\psi + z)]$

Herramientas como *GeoStudio SEEP/W* permiten modelar este comportamiento en régimen transiente, incorporando condiciones de borde variables (nivel de laguna, infiltración, drenes) y la heterogeneidad de conductividad hidráulica no saturada propia de la playa seca y el talud.

- **Integración con Transporte de Solutos:** Al acoplar el modelo de flujo con un modelo de transporte de solutos, es posible anticipar no sólo hacia dónde se mueve el agua, sino qué constituyentes químicos podrían movilizarse con ella hacia el acuífero receptor —el puente conceptual que conecta la hidráulica del depósito con la protección de la calidad del agua subterránea aguas abajo.

4. EL EJERCICIO PROFESIONAL EN TERRENO: GEOMÁTICA PREDICTIVA

La validación en terreno de estos modelos es, cada vez más, un ejercicio de geomática aplicada a la gestión del riesgo:

- **Piezometría de Cuerda Vibrante en Tiempo Real:** Redes de sensores que entregan mediciones continuas de presión de poros en múltiples profundidades, permitiendo detectar tendencias antes de que se conviertan en anomalías.
- **Fotogrametría UAV y Escáner LiDAR 3D:** Los levantamientos con drones y escaneo láser permiten cuantificar con precisión métrica y volumétrica la evolución del muro, la playa seca y la laguna en el tiempo, información esencial para actualizar el balance hídrico y detectar cambios geomorfológicos tempranos (pérdida de ancho de playa o asentamientos localizados).
- **Integración en Plataformas SIG:** La superposición de datos de piezometría, geomorfología, teledetección y modelos numéricos en un Sistema de Información Geográfica transforma datos dispersos en una capa de gestión preventiva del riesgo, con visibilidad espacial y temporal para la toma de decisiones.

Este es, en el fondo, el aporte distintivo de la mirada geográfica: no solo calcular un número, sino situarlo espacialmente en el territorio y seguir su evolución en el tiempo.

CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE VALOR

El nivel freático de un depósito de relaves no vive dentro de una ecuación aislada: vive dentro de una cuenca, con su propio clima, su propia geomorfología y sus propias comunidades. Tratarlo únicamente como un parámetro de estabilidad de taludes es una simplificación que el territorio, tarde o temprano, termina por corregir.

En Mercator Ingenieros, desde el Área de Análisis Territorial y Medio Ambiente, integramos la hidrogeología, la geotecnia y la geomática predictiva en una sola mirada: entendemos el nivel freático como la frontera dinámica entre la seguridad de la operación minera y la sustentabilidad hídrica del territorio que la rodea. Si tu proyecto necesita esa mirada integrada —desde el modelo numérico hasta el monitoreo en terreno, conversemos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2019). Guía Técnica de Diseños de Depósitos de Relaves. Santiago, Chile.
- Ministerio de Minería, Chile. (2007). Decreto Supremo N°248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. Santiago, Chile.
- Global Tailings Review (ICMM, UNEP & PRI). (2020). Global Industry Standard on Tailings Management. International Council on Mining and Metals, UN Environment Programme y Principles for Responsible Investment.
- Casagrande, A. (1937). Seepage through dams. Journal of the New England Water Works Association, 51(2), 131-172.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Vick, S. G. (1990). Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishing, Vancouver.
- Geo-Slope International Ltd. (2023). SEEP/W: Seepage Modeling Software. Calgary, Canadá.