

## HIDROGEOLOGÍA PARA EL DRENAJE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUS IMPLICANCIAS EN LOS PROYECTOS MINEROS SUBTERRÁNEOS

Dimas Apaza Idme <sup>1</sup>, David Carhuaz <sup>2</sup> y Hernán Padilla <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hidrogeólogo Senior - Golder Associates Perú S.A. Área de Hidrotecnia – Grupo de Aguas Subterráneas.

<sup>3</sup> Hidrólogo e Hidráulico Senior Golder Associates Perú S.A., Área de Hidrotecnia – Grupo de Aguas Superficiales  
Av. La Paz 945 Miraflores, Telf. (51-1)610-6700. Lima 18 - Perú ✉ [dapaza@golder.com.pe](mailto:dapaza@golder.com.pe) y ✉ [hpadilla@golder.com](mailto:hpadilla@golder.com)

<sup>2</sup> Ingeniero Ambiental – Superintendente de Medio Ambiente, Empresa Administradora Chungar S.A.C. Vólcan Ltda.  
Av. Gregorio Escobedo 710, Jesús María, Lima Perú. ✉ [dcarhuaz@volcan.com.pe](mailto:dcarhuaz@volcan.com.pe).

### INTRODUCCIÓN

Es frecuente observar en las minas de Perú el desarrollo de trabajos de drenaje somero y profundo de aguas subterráneas para la explotación de yacimientos mineros, por lo que, es necesario el conocimiento previo de la hidrogeología del área, las características de explotación, unidades de bombeo disponibles, así como las instalaciones de beneficio para el procesamiento del mineral.

Las explotaciones mineras a menudo se concentran sobre rocas ígneas cristalinas asociadas con rocas calcáreas y/o detríticas, que son productoras de agua subterránea, y otras que limitan ó controlan la migración de los flujos del agua, lo que complica en diferente grado la extracción mineral por la presencia de aguas subterráneas.

El ejemplo citado para el presente artículo, es el caso de mina Animón, trabajada desde inicios del pasado siglo, próximos a cumplir 100 años de operación continua, ubicada en el distrito de Huayllay, Dpto. Junín, en la altiplanicie de los Andes centrales del Perú, (figura 1). Es una minería polimetálica de Pb, Zn, Ag, Cu, que explota minerales como; galena, esfalerita, calcopirita y plata en cobres grises, tenantita a tetrahedrita.

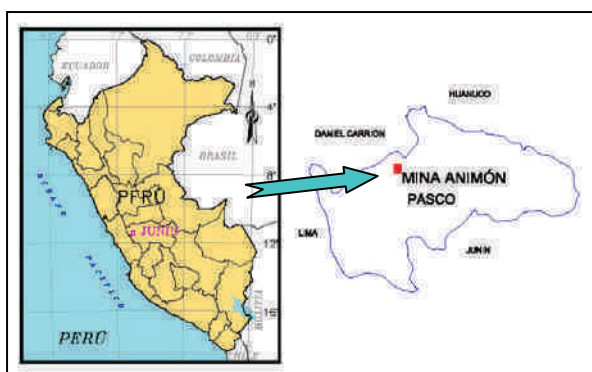


Figura 1. Mapa de la zona del Proyecto Animón en el Departamento de Pasco - Perú

La explotación de la mina se encuentra en el Nivel 4 250 y se proyecta profundizar hasta el Nivel 4 100 explotando cinco (5) vetas, en un horizonte de seis (6) años (2008 - 2014). Para este efecto fue necesario realizar la evaluación hidrológica e hidrogeológica para estimar el caudal de drenaje durante su profundización y además de evaluar la infraestructura hidráulica para el manejo del agua.

Para entender el sistema fue necesario desarrollar el modelo hidrogeológico, el cual está marcado por el anticlinal Huarón, que expone los estratos finos de margas y arcillitas de la Formación Casapalca Inferior (figura 2). Estas margas han sido intruidas por un enjambre de vetas, que son objeto de explotación minera y a su vez constituyen el conducto para el flujo de las aguas subterráneas dentro de las galerías de explotación. Este sistema es alimentado por la recarga de facies de areniscas y conglomerados laterales del Casapalca Medio.

De manera excepcional debajo de la laguna Naticocha Centro se ubica una zona geotermal de alta entalpía, con presencia de aguas termales surgentes de 43 °C, a 4 100 msnm, estas se encuentran confinadas por las margas.

## 2. METODOLOGÍA

Se desarrolló el mapeo hidrogeológico, encontrando escasas surgencias naturales, entre ellas; manantiales, bofedales de importancia y filtraciones superficiales, probablemente por el descenso del nivel freático por el drenaje minero. También se registró 14 sondeos y piezómetros existentes, realizando la lectura de los niveles y la calidad del agua, estableciendo una red de monitoreo en los cursos superficiales y lagunas próximas al área de influencia directa e indirecta.

Se realizó el inventario de descargas y flujos dentro de la mina subterránea, evaluando surgencias dentro de las labores a distintos niveles, en total se identificó 22 puntos de descarga: entre ellos nueve (9) en taladros, seis (6) filtraciones en roca y tres (3) descargas en piques y cuatro (4) drenajes en túneles. En todas las estaciones se tomó caudales, niveles, y parámetros hidroquímicos de campo; T °C, EC, pH, Eh, STD, etc. base del análisis hidrogeológico.

Se programó diez (10) perforaciones hidrogeológicas de superficie de 15 a 20 m y 4 sondeos de 150 a 250 m en las labores profundas, utilizando perforación diamantina HQ con recuperación de muestras e instalación de tuberías PVC (2 pulg.). El objeto fue caracterizar las unidades hidrogeológicas proporcionando información sobre la litología, propiedades hidráulicas, niveles y calidad de las aguas subterráneas.

Se realizaron pruebas hidráulicas por el método de “Slug Tests” con nivel variable, provocando el abatimiento instantáneo de los niveles dentro del sondeo en función del tiempo, los resultados fueron calculados mediante la ecuación de Hvorslev. En las labores mineras se programaron cuatro (4) sondeos profundos, los que registraron aguas termominerales en los sondeos; PMM-2A, PMM-2B y PMM-2C, con caudales de más de 30 l/s y presiones de 22 PSI (PMM-2A) hasta 36 PSI (PMM-2C), correspondiente a cargas de 25 m de columna de agua.

Se seleccionaron 20 puntos representativos para el muestreo de las aguas, realizado en junio del 2008: tres (03) manantiales, cuatro (04) pozos de monitoreo poco profundos en superficie y una (01) perforación y cuatro (04) filtraciones de agua subterránea en mina (nivel 250) y el muestreo de noviembre del 2008 en seis (06) pozos someros y dos (02) pozos de interior mina (nivel 250). Las muestras se tomaron en botellas polietileno de 500 y 250 mililitros con tapones herméticos, filtrados y acidificados *in situ*, y fueron conservadas a 4 °C para ser analizados en los laboratorios de ALS Perú. La determinación de aniones se realizó mediante cromatografía iónica, cationes se ejecutó mediante espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, los bicarbonatos se obtuvieron por volumetría ácido-base y los elementos traza mediante plasma de inducción acoplada.

Finalmente se realizó la modelización matemática de flujo, para estimar el volumen de descarga actual y futura, dimensionando los caudales de drenaje en base al plan de minado futuro, para lo cual se preparó un modelo numérico en 3D utilizando el Visual MODFLOW, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América. El dominio del modelo numérico abarcó un área de 11,6 km<sup>2</sup> que cubre el área de la mina Animón.

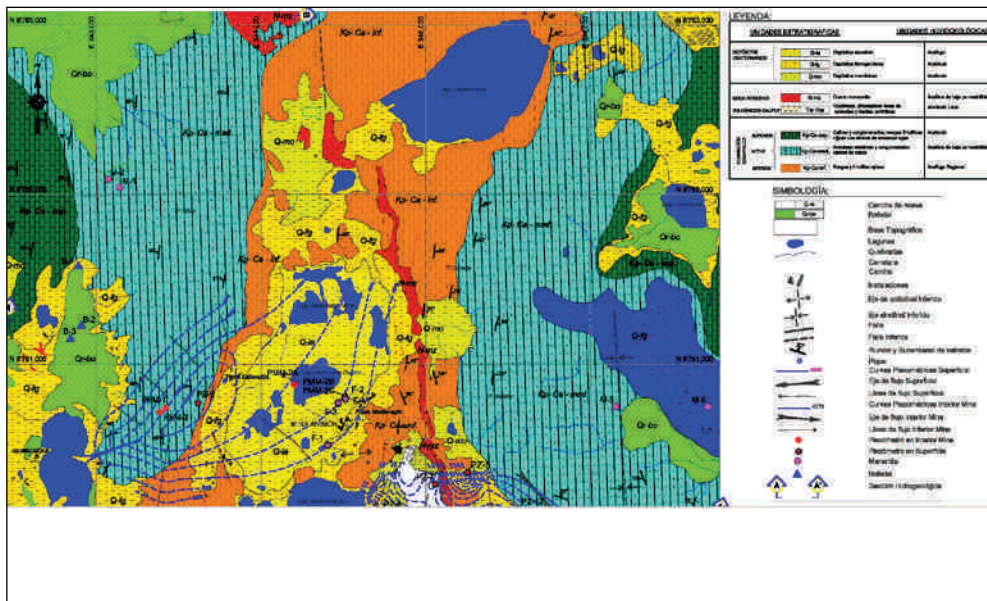


Figura 2. Mapa Hidrogeológico del área de Animón y Huarón, en la región Central del Perú.



Figura 3. Perforación de sondeos de investigación hidrogeológica, descarga y medida de presiones de las aguas subterráneas confinadas

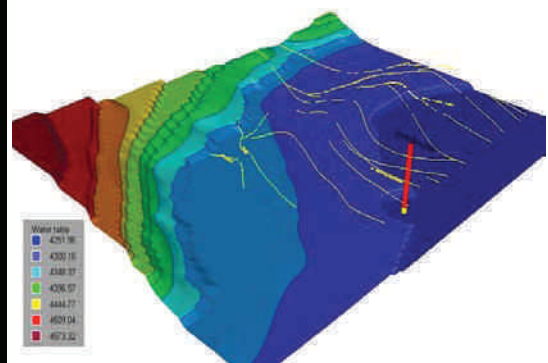


Figura 4. Modelo digital de terreno, representación de vetas y cargas hidráulicas de las unidades hidrogeológicas Animón

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precipitación estimada para la subcuenca Naticocha es 1150 mm/año, equivalentes a 42,4 m<sup>3</sup>/s para la superficie tributaria de 9 627 ha. donde se encuentra la mina Animón. La evaporación potencial estimada para la subcuenca Naticocha, en base a la fórmula de Thornthwaite dio lugar a 1 115 mm/año o a 12,6 m<sup>3</sup>/s, sobre el área de estudio de 2 975 ha, equivalente al 30% de precipitación media anual. La evapotranspiración real para las áreas de vegetación; zonas de pastizales, bofedales de 7 731 ha es equivalente a 16,8 m<sup>3</sup>/s o al 40% de la precipitación media anual. La recarga media anual del área de las operaciones mineras es de 66.5 l/s, calculado para un área de 2.46 km<sup>2</sup> equivalente al flujo base en los riachuelos adyacentes, como lámina de precipitación se estima en 92 mm/año, equivalente al 8% de la precipitación total anual.

Se ha identificado cuatro (4) unidades hidrogeológicas que controlan la recarga y el flujo de las aguas subterráneas, dentro de las unidades consideradas permeables están los estratos de areniscas y conglomerados del Cretáceo medio a superior (Casapalca Medio-Superior), estas capas se encuentran dispuestas en estratos tabulares y plegados dentro del gran anticlinal Huarón (Figura 4); a) Acuífugo – Margas Casapalca Inferior, b) Acuífero Fisurado – Areniscas Casapalca Medio, c) Acuícludo – Calizas y Margas Casapalca Superior, y d) Acuitardo – Arcillas fluvio-glaciales.

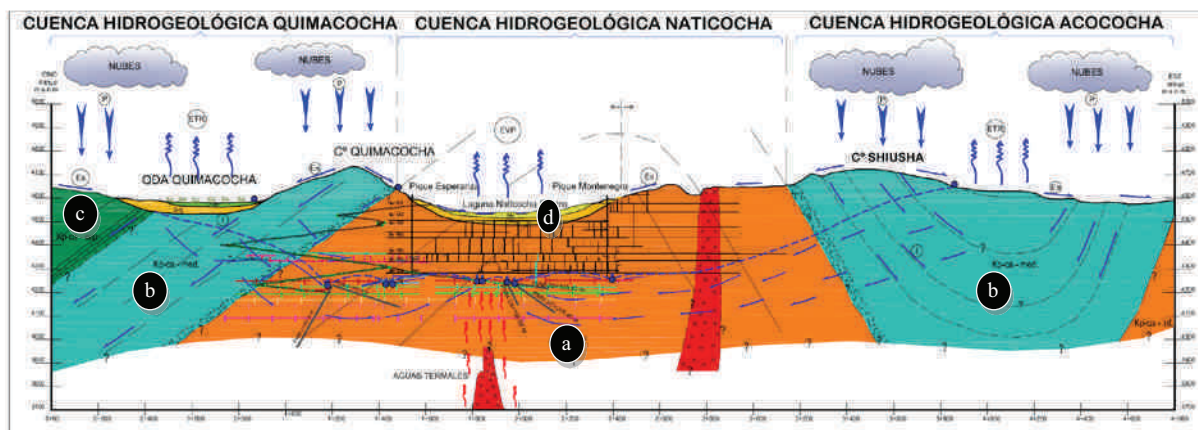


Figura 4. Modelo Hidrogeológico conceptual de flujo de las aguas subterráneas del área de la Mina Animón

Las unidades más importantes se encuentran en las secuencias sedimentarias del Casapalca, y también en las rocas intrusivas cristalinas de cuarzo monzonita, los estratos presentan gran heterogeneidad, y reducida permeabilidad primaria contribuida por la concentración de fracturas, por lo que la recarga es limitada a estas unidades, controlados por la presencia de fallas, fracturas y zonas meteorizadas. La descarga de las aguas subterráneas se producen por medio de las vetas y drusas mineralizadas de 1,5 a 4 m de espesor, las líneas de drenaje se centran en las galerías y chimeneas laterales y de profundización. Los resultados de las pruebas hidráulicas en superficie y profundidad se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Resumen de características hidráulicas por Unidad Hidrogeológica

Unidad Estratigráfica	Unidad Hidrogeológica	Litología	Conductividad Hidráulica	
			(m/s)	(m/d)
Cuaternario	Fluvioglaciares	Arcilla con Grava	8,0 E-7 – 6,9E-6	0,07 – 0,6
Fm. Casapalca	Inferior	Margas y Limolitas	2,5E-8 – 3,6E-6	0,002 – 0,3
	Medio	Vetas, labores profundas	2,5E-5 – 9,8E-5	0,28 – 3,0
	Medio	Arenisca cuarzosa Fracturada	1,9E-5 – 2,3E-5	1,7 - 2,0

(\*) Fuente: perforaciones exploratorias de abril a noviembre del 2008. Golder Associates Perú S.A.

El registro de la evolución de niveles piezométricos durante el 2007 y 2008, muestran que los niveles de agua subterránea tienen poca fluctuación en el rango de 0,5 a 1 m. durante todo el año, debido a la influencia de la temporada de lluvias y excepcionalmente los piezómetros PZ-01 y Pz-02, muestran un ascenso mayor en su nivel desde abril 2008, localizado alrededor de la cancha de relaves N° 3.

Las aguas de los manantiales y aguas subterráneas de las galerías son similares; el pH en los manantiales oscila entre 7,2 y 8,2; mientras que en las aguas subterráneas poco profundas oscila entre 7,3 y 8,5 denotando características básicas, sin embargo, las aguas subterráneas profundas presentan valores de pH entre 6,4 y 7,7 denotando características de ligeramente ácidas a básicas. El mismo patrón se evidencia en los valores de conductividad eléctrica para los manantiales que oscilan entre 117 a 247  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y para aguas poco profundas entre 108 a 366  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en aguas profundas entre 354 a 2 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores de temperatura de manantiales oscilan entre 5,4 °C y 15,6 °C, en las aguas poco profundas entre 7,3 °C y 21°C y en las aguas profundas se incrementan de 19,7 °C hasta 37,9 °C.

La química de los iones principales muestra dos tipos de agua bien diferenciadas:  $\text{Ca-HCO}_3$  y  $\text{Ca-SO}_4$ ; la primera pertenece a las aguas de manantiales y pozos de monitoreo PZ-4, PZ-5, PZ-9 y PZ-15 que se encuentran influenciadas por su contacto con rocas carbonatadas, margas y areniscas calcáreas. Las aguas sulfatadas cálcicas ( $\text{Ca-SO}_4$ ) pertenecen a aguas profundas que se encuentran en contacto con veta y áreas mineralizadas. Los minerales de sulfuros en la mina son principalmente pirita, galena y esfalerita.



En la zona central de la mina Animón, se ha observado surgencia de aguas termales, que constituyen al flujo del área de la veta principal Nivel 250, localizado en fallas verticales y grietas de circulación ascensional en un radio aproximado de 200 m con una descarga de 80 l/s. Este flujo se va desplazando en función del avance de la galería y vetas de 3.5 m de ancho, los cuales se mezclan con aguas frías de la zona alterada que descargan de las labores laterales que son provenientes de los acuíferos adyacentes. Actualmente, se viene drenando en la labor del Nivel – 250, el flujo mayor se produce por la veta principal, la cual descarga un caudal de 147 l/s (16/04/2008) de forma permanente, aforado en el punto de descarga en pleno avance.

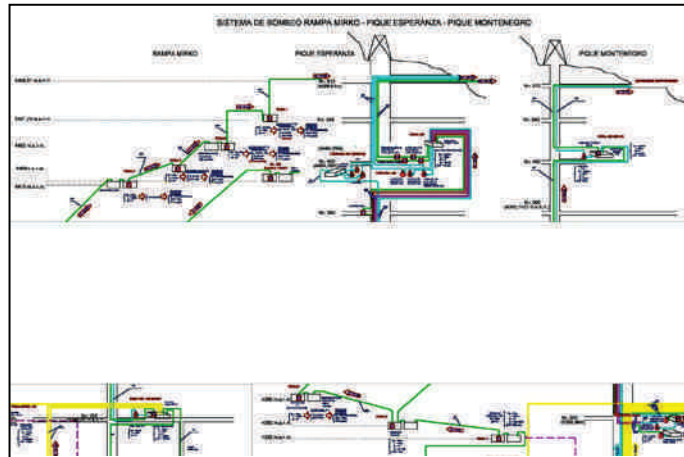


Figura 5. Diagrama de flujo de bombeo de aguas subterráneas

## CONCLUSIONES

La descarga de las aguas subterráneas en las labores internas de la Mina subterránea Animón se producen por medio de vetas y estratos de areniscas y conglomerados de moderada permeabilidad, estas aguas descargan de las galerías laterales con un caudal de 160 l/s, de manera permanente.

Las descargas de agua subterránea son fluctuantes, los caudales crecen cuando se perfora nuevas zonas de veta al profundizar su nivel, manteniendo su caudal durante 3 a 6 meses, luego decrece el gradiente hidráulico para disminuir la descarga, reduciendo los flujos hacia el piso de la galería.

Las labores de profundización se realizarán en tres etapas de 50 m c/u, cada dos años, de acuerdo a esta condición en base a la modelación matemática realizada, se ha estimado la descarga de un volumen de drenaje futuro entre 260 l/s a 300 l/s calculado para un horizonte de 6 años (2008 - 2014).

Se recomienda incorporar para el proceso de drenaje pozos tubulares verticales, ubicados en áreas de mayor potencia de vetas, con el objeto de deprimir la napa freática, lo que facilitará el proceso de minado y extracción de mineral en el frente de perforación, reduciendo el contenido de sólidos suspendidos, y mejorando la eficiencia de las unidades de bombeo.

De acuerdo a la considerable altura de impulsión de 350 m de desnivel, es necesaria la apertura del túnel de drenaje Paúl Nevejans ó túnel nuevo exclusivamente para este fin, esto reduciría los costos de bombeo y consumo de energía.

## REFERENCIAS

- Empresa Administradora Chungar EACH CHUNGAR. Setiembre 2006. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental: Depósito de Desmonte Esperanza, Unidad Minera Animón.
- Empresa Administradora Chungar EACH CHUNGAR. 2006. Informe Geología Regional Mina Animón - Pasco, Junín. VOLCAN CM S.A.A. Exploraciones.
- Ground Water International GWI, Abril 2005. Estudio Hidrogeológico de la U. M. Huarón Animón.
- Golder Associates Perú S.A. Estudio Hidrológico e Hidrogeológico y Manejo de la Mina Animón. EACH Chungar S.A.
- INGEMMET, 1996. Boletín Geología del Cuadrángulo Cerro de Pasco, Hoja 22-K.
- INGEMMET, 1996. Boletín N° 8 INGEMMET, Geología del Centro del Perú. F Megard.