

## MODELO LITOGEOQUÍMICO DE ALTERACION EN 3D Y SU IMPLICANCIA EN LOS CONTROLES DE LA MINERALIZACION DEL YACIMIENTO VMS CERRO LINDO

Maylin Mendoza Mondragón<sup>1</sup>, Cristina Palacios Allca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nexa Resources, Lima, Perú (maylin.mendoza@nexaresources.com)

<sup>2</sup> Explomin del Perú, Lima, Perú (cristina.palacios@gmail.com)

### 1. Abstract

The interpretation of lithogeochemical diagrams established alteration assemblies (J. Bueno & M. Mendoza, 2019). From this, these assemblies were plotted in the diamond drill holes and a 3D alteration model was generated for Ore Body 1 and 2 (OB1-OB2), in order to give the lithogeochemical data a 3D approach and determine alteration trends and establish a correlation with other mineralization controls (structural, geophysical, geochemical). This information is intended to support the creation of an explicit alteration model that has now been completed with other exploration tools that serve to generate new targets at the Cerro Lindo Mining Unit.

### 2. Introducción

El área de estudio se ubica en la parte occidental del Perú, en la provincia de Chinchá, departamento de Ica, a 175 km al SE de Lima. Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico VMS de Zn-Cu (Ag-Pb), 52 Mt de Reservas (P+P) con 1.44 %Zn, 0.61%Cu, 0.20%Pb, 0.68 oz/t Ag (2020), y está compuesto de varios cuerpos subverticales.

El yacimiento está emplazado en la cuenca back-arc cretácica en rocas félsicas que gradan de composición andesítica, dacítica a riódacítica; siendo las rocas proximales las que presentan mayor relación con la mineralización (riódacitas).

Cerro Lindo posee una geometría peculiar de cono invertido con gradientes geotérmicos que van desde 200° a 350°C los cuales guardan relación con el Zonamiento de la mineralización; la zona de

alta temperatura (Po-Py) y zona de baja temperatura (Sp-Gn-Py-Ba) (Figura 1).

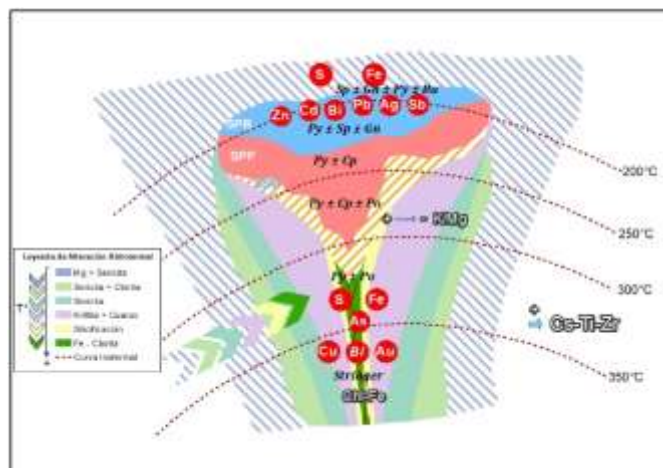


Figura 1: Modelo esquemático de alteración hidrotermal en Cerro Lindo (Informe de Exploraciones Cerro Lindo, 2018).

El índice CCPI vs AI (Ishikawa et al., 1976) presenta un vector hacia la mineralización, en el centro del sistema se observa sericita potásica más clorita con contenido elevado de Fe (clorita-pirita); y en las partes más distales clorita magnésica, calcita y epidota (Bueno & Mendoza, 2019).

El emplazamiento de los sulfuros masivos del depósito refleja un fuerte control estructural en su formación y preservación, ya que los cuerpos mineralizados se alinean en bloques estructurales delimitados por fallas que actuaron como conductos de mineralización con rumbo (NW-SE). (Hinostroza, 2009).

Por medio de diagramas litogeoquímicos se establecieron los ensambles de alteración (Bueno & Mendoza, 2019). Se planteó estos ensambles en

los sondajes diamantinos y se generó un modelo de alteración en 3D para el ore bodies 1 y 2 (OB1 y OB2), con la finalidad, de determinar las tendencias de alteración y establecer una correlación con otras guías de la mineralización (estructural, geofísica, geoquímica) en el contexto espacial. Con este set esta información se buscó sustentar la creación de un modelo de alteración que completado con otras herramientas de exploración sirvan para generar nuevos targets en la Unidad Minera Cerro Lindo.

## 2. Metodología

Se tomó como referencia las interpretaciones de los diagramas litogeoquímicos de Alteración Box Plot (Large et al., 2001) e índice de alteración de Hashimoto (Al, Ishikawa et al., 1976) complementado con el gráfico Molar Al/Zr vs (Na+K)/Zr (Stanley & Madeisky, 1994) para este análisis se incluyó 448 muestras de sondajes diamantinos en zonas de roca caja, las muestras se analizaron por el tipo de análisis ICP-MS por el método LF200 (fusión en metaborato de litio).

En base a los resultados obtenidos se establecieron ensambles de alteración los cuales se plotearon en los sondajes diamantinos y se realizaron secciones transversales para poder generar un modelo de alteración, en base a las interpretaciones.

Al ser el OB1 y el OB2, los cuerpos con mayor información litogeoquímica, lo cual permite establecer un mejor análisis y por ende un modelo 3D mejor sustentado, y considerando que el OB1 y OB2 presentan un comportamiento de la mineralización diferenciado entre sí, por ser de diferentes eventos (justificado con secuencias paragenéticas) y tener controles estructurales asociados a diferentes sistemas de fallas (Figura 2)

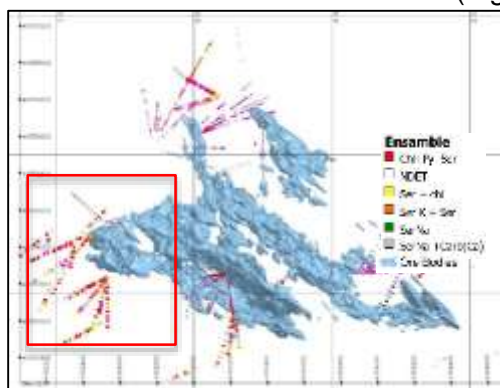


Figura 2: Distribución espacial en planta de los sondajes diamantinos con ensambles de alteración.

El modelo de alteración en el OB1 y OB2, esta alimentado de 27 sondajes diamantinos que fueron muestreados de manera puntual solo en la roca caja volcánica y de forma sistemática en función de las profundidades del sondaje diamantino. A partir de esto se elaboró el modelo de alteración, tomando como referencia los cuerpos mineralizados, lo que nos permitió determinar el vector guía de alteración para la búsqueda de nuevos cuerpos mineralizados; al establecer correlaciones con los controles estructurales, geofísicos y geoquímicos de la mineralización estudiados en Cerro Lindo, para complementar esta interpretación se plotó la geoquímica de Zn-Cu, para poder tener delimitados los zonas con mayor ley para estos elementos.



Diagrama 1: Proceso de la metodología aplicada.

## 4. Modelo 3D de alteración

Se consideró realizar el modelo del OB1 y el OB2 debido a las diferentes características que poseen; el OB1 pertenece a un primer evento de la mineralización (evento primario), es de baja ley de Cu y Zn, con litología principalmente de SSM (mineralización en bandas sobre roca volcánica, y controlado por fallas de poca profundidad NW-SW, las cuales transportaron mineralización de tipo Cpy1, además se ubica hacia la zona de Borde del yacimiento; mientras que el OB2 es un cuerpo de sulfuros masivos de alta ley de Cu y Zn, relacionado a eventos posteriores de la mineralización, con dominio de SPB (sulfuro primario de Baritina) y SPP (sulfuro primario de pirita), está controlado por fallas profundas NW-SE y que pertenece al corredor estructural principal que nos permitirá definir mejor los vectores de alteración (Canales, 2015).

En base a los ensambles de alteración determinados por la interpretación del diagrama CCPI/Al, se llevó esta información a los sondajes diamantinos y se generaron e interpretaron secciones que establecieron los siguientes dominios relacionados al mismo evento de mineralización: (Figura 3)

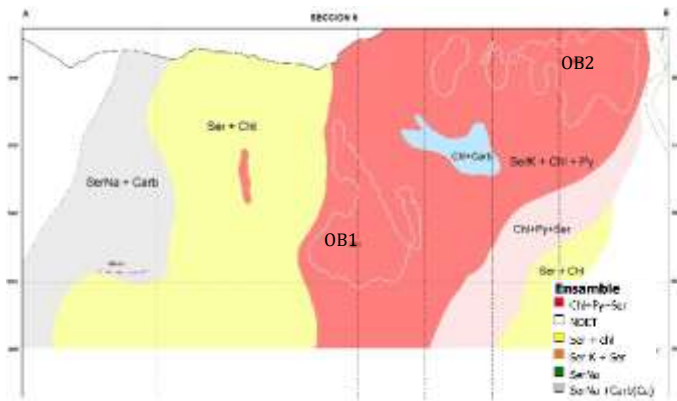


Figura 3: Sección transversal N° 6, dominios de alteración según ensamble del gráfico CCPI vs AI.

El ensamble más cercano a la zona mineralizada está determinado por SerK+ChlFe [0.8-1] (zona caliente). Hacia la zona más distal se observan finos halos de Ser-Na [0.4-0.6] y de manera muy aislada a los bordes ChlMg [1-1.6] (zona fría) (Figura 4)

**SerK+ChlFe(Py) [0.8-1] (zona caliente)**, es el halo de alteración más cercano a la zona mineralizada que abarca en su mayor potencia 500 m de ancho por 600m de profundidad, es el halo más extenso y pervasivo que abarca tanto la roca techo como la roca caja. Esta zona está marcada por la pérdida del Na<sub>2</sub>O y CaO pero enriquecimiento en K. La piritización se produce como diseminaciones, parches y venillas enriqueciendo en Fe a la clorita de alteración de esta zona.

La zona SerK+ChlFe (Py) está relacionada principalmente a la zona de debilidad (fallamiento). Esta alteración se hace más potente hacia los cuerpos de sulfuros masivos de alta ley (OB2) (segundo evento de mineralización (Figura 4).

**SerK+Chl [0.8-0.4]** zona de intermedia temperatura, son delgados halos que se presenta de forma puntual y se emplaza en las zonas donde se observa contactos entre riolacitas y riolitas. En esta zona empieza a marcar la presencia de mineralización, pirita diseminada y en parches con presencia puntual de Calcopirita (SSM). Se evidencia la pérdida de Fe en la clorita, y K en la sericita. Se extiende con mayor proporción hacia cuerpos de baja ley (primeros eventos de mineralización) (Figura 4)

**Ser - Na [0.4-0.6]- zona fría**, son halos de poca dimensión, esta alteración es no pervasiva,

relacionadas a rocas menos diferenciadas andesita-dacita. Disminución del K y aumento del Na en las micas. (Figura 4)

**ChlMg [1-1.6] (zona fría)**, esta alteración es puntual, relacionada en zonas de intrusivo y diques andesíticos, que corresponde a las eventos más tempranos de alteración, enriquecimiento de Mg principalmente en la clorita y Calcita en venillas. (Figura 4)

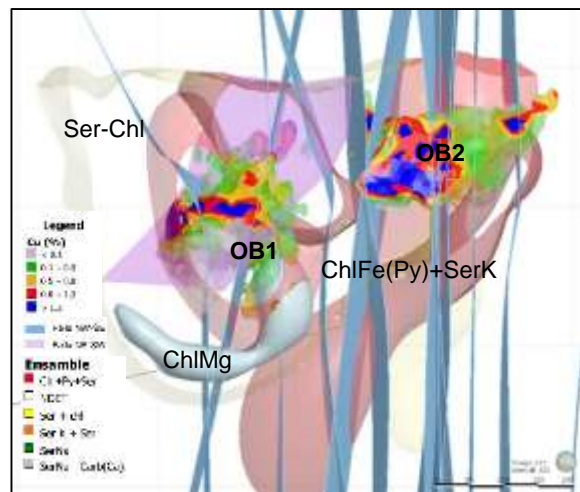


Figura 4: Modelo de alteración 3D en el Yacimiento Cerro Lindo con la geoquímica de Cu (OB1-OB2)

## 5. Correlación de la litogeoquímica con otros controles de la mineralización

### 5.1 Litogeoquímica-Geoquímica Vs Geología Estructural

El yacimiento de Cerro Lindo está hospedado en una secuencia volcánica félsica con afloramientos expuestos en una franja de dirección NW-SE. Este nivel volcánico presenta grandes halos de alteración con diferentes mineralogías e intensidad de alteración, los cuales han sido afectados por las variaciones térmicas y por los grandes sistemas de fallas NW-SE y fallas posteriores N-S.

El OB1 cuyo control ha sido marcado por fallas poco profundas NW-SW de mayor ángulo y con mayor espaciamiento entre sí, son de borde con poco arrastre de mineralización económica, relacionadas a la alteración Ser -Chl y las fallas NE-SW las cuales han sido los conductos de las zonas puntuales de alta ley en el OB1, estas zonas presentan un fuerte halo de alteración SerK+ChlFe (Py) (Figura 5)



En el OB2 se observa un gran sistema de fallas profundas NW-SE, las cuales traen mineralización económica y se acercan hacia la zona de SerK+ChlFe (Py) (Figura 5).

Al existir el control estructural profundo con sistemas de fallas (NW-SE) cuyos esfuerzos han sido continuos y el dip de menor ángulo, son las más favorables para formar zonas económicas y presentaran la relación con la alteración guía hacia el centro del cuerpo.

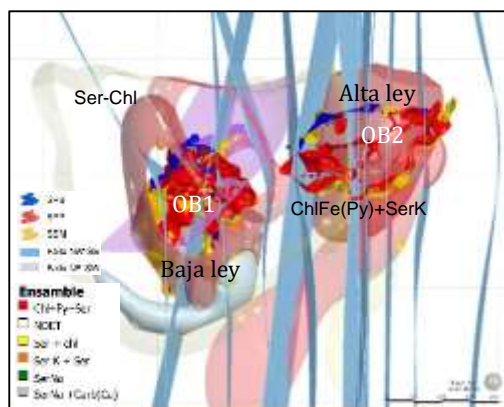


Figura 5: Modelo de alteración Vs Estructural Vs Litología

## 5.2 Litogeoquímica-Geoquímica Vs Geofísica

Según los trabajos de geofísica PI realizados en el año 2017 se detecta anomalías de baja resistividad (40ohm-m) y alta capacidad de cargabilidad (40mrad). Esto podría indicar una continuación de mineralización de la unidad minera. (Ver Fig. 6)

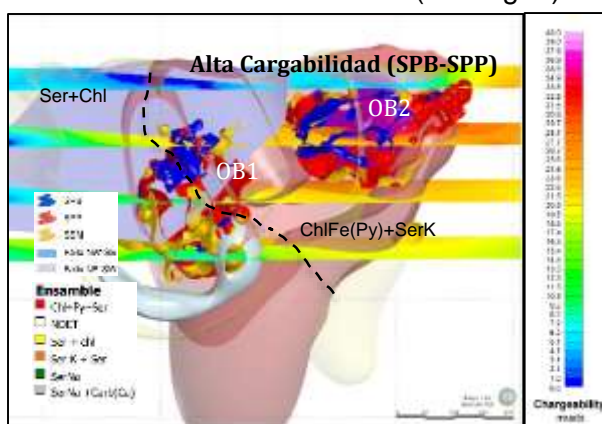


Figura 6: Geofísica (Cargabilidad) Vs Alteración Vs Litología.

El OB1 presenta baja cargabilidad debido al tipo de litología (SSM), con contenido del 20 al 50 % de sulfuros. Esta zona guarda relación con la zona de baja ley (parte inferior del cuerpo) donde se

extiende el halo Ser+Chl y de manera puntual aparece la ChlMg (Figura 6).

El OB2 presenta alta cargabilidad debido al emplazamiento masivo de sulfuro >50% (SPP-SPB) y guarda relación con la zona de alteración que es la guía al centro de los cuerpos mineralizados (Figura 6).

## 6. Resultados

El modelo de alteración para el OB1 y OB2 sugiere que la alteración SerK+ChlFe (Py) forma el halo proximal que bordea la mineralización. Este halo varía su potencia en función de la profundidad y temperatura. A mayor temperatura la alteración se torna más extensa y se relaciona a (zona de Cpy-Po) mientras; en la zona superior del sistema VMS la potencia disminuye (zona de Sp-Gn-Ba), y aumenta la potencia de la alteración Ser+Chl.

En la sección A-A' tomada a un sondaje diamantino vemos que la zona de alta ley comprende justamente a la alteración ChlFe (Py) + SerK y a menos de 20 metros de esta zona mineralizada donde las leyes empiezan a decrecer está el predominio de Ser + Chl, tener en cuenta que muy cerca de la zona de alta ley se forma un delgado halo de Ser K justo hacia el Este donde se evidencia los demás emplazamientos de los cuerpos mineralizados del yacimiento (Figura 7)

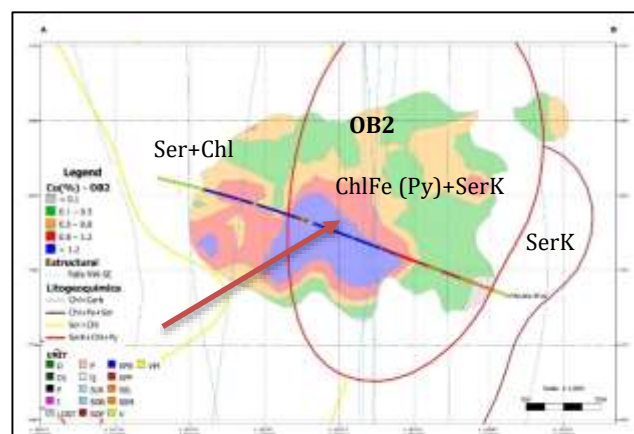


Figura 7: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración, con Caracterización de alteración y geoquímica del Cu en el OB1

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

Al llevar la data litogeoquímica generalmente usada en diagramas de interpretación a un modelo tridimensional ha permitido tener una mejor correlación con el control litológico, geofísico,

geoquímico y estructural, y se logró establecer un vector definido de la siguiente manera (riolita-riodacita + fallas NW-SE (mineralizadas)+ SerK+ChlFe (Py) + cargabilidad alta). Este vector que combina todos los controles de la mineralización llevaría a acercarnos de manera más certera zonas con potencial económico en un yacimiento tipo VMS.

Del modelo de alteración se concluye que hacia los cuerpos masivos con altas leyes en Zn –Cu como el OB2 prevalece el dominio el ensamble (SerK+ChlFe (Py)) y hacia los cuerpos piritosos con escasa calcopirita el halo con mayor predominio es Ser (K)+Chl.

El halo de alteración SerK+ChlFe(Py) tiene mayor potencia y dominio en fallas profundas que han traído mineralización económica de Zn –Cu (NW-SE y NE-SW), fallas relacionadas a los cuerpos de alta ley; mientras que las fallas poco profundas NW-SE, que traen mineralización de baja ley se relacionan a la alteración Ser-Chl.

La geofísica nos indica que la alta cargabilidad está relacionada a los cuerpos masivos. Por ende el OB1 es un cuerpo conformado principalmente por litología de SSM (volcánico con pirita diseminada), por lo cual presenta poca cargabilidad; en cambio el OB2 es un cuerpo masivo de sulfuros (Py-Cpy-Sp), lo que le da mayor cargabilidad. Determinamos que la alteración SerK+ChlFe (Py) está limitada a las zonas de alta cargabilidad (zonas potencialmente económicas).

La metodología utilizada en este trabajo puede extenderse para la obtención de modelos de exploración similares para los otros sectores del distrito (Chavín del Sur, Pathuasi Millay, etc).

En base a esta tendencia de alteración, usamos estos criterios en conjunto con el control estructural y litológico, y el resultado obtenido en la exploración del OB12 (Exploraciones Cerro Lindo, 2019), nos llevó a concluir que en otras partes del sistema mineralizado de Cerro Lindo se observa similares vectores de alteración hacia cuerpos de sulfuros masivos. (Figuras 8 & 9),

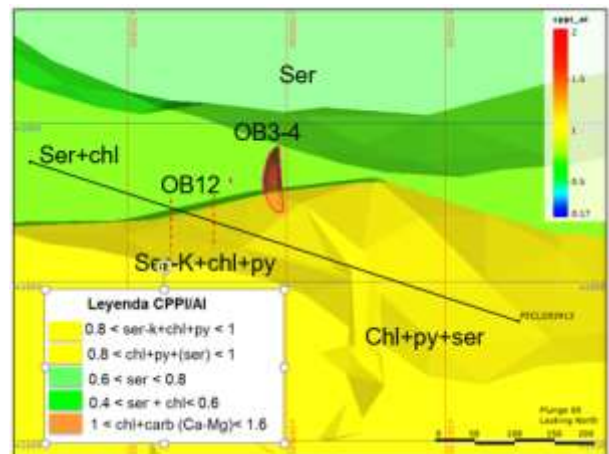


Figura 8: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración, con Caracterización de alteración en el OB12 y OB3-4.

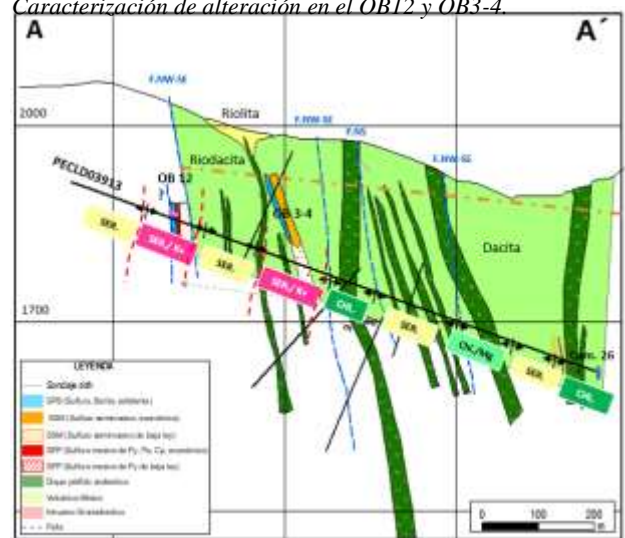


Figura 9: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración con halos de alteración OB12 y OB3-4.

Se recomienda incrementar la data en otros cuerpos referenciales con las tendencias ya determinadas para corroborar los vectores y establecer firmas de alteración

### Agradecimientos

A la compañía minera Nexa Resources por facilitar la información requerida para la elaboración del presente trabajo y a los geólogos de la Unidad Minera Cerro Lindo, por el apoyo constante y el trabajo en equipo.

### Referencias

Bueno, J. & Mendoza, M (2019), Caracterización litogeoquímica en el Yacimiento VMS-Cerro Lindo y su relación con la mineralización para



determiner vectores guías en la exploración.  
Lima, Perú. Proexplo2019.

Canales, J, (2015). Informe de Cartografiado geológico-estructural y muestreo geoquímico - litogeoquímico Cerro lindo.

Hinostroza de la Cruz, J.H., (2009). Proyecto Cerro Lindo. Geología y Zonamiento Cu-Zn. Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú.

Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Ywaya, S., and Horiuchi, M., (1976), Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite.

Large, R.R, Gemmel, J.B., Paulick, H., and Huston, D.L., 2001, Hidrotermal alteration and volatile element haloes for the Rosebery K lens volcanic-hosted massive sulfide deposit, western Tasmania; *Economic Geology*, v. 96, p. 1055-1072.

Stanley, C.R. and Madeisky, H.E., 1994, Litogeochemical exploration for hydrothermal ore deposits using Pearce Element Ratio analysis, in *Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems*, (ed.) D.R. Lentz; Geological Association of Canada, Short Course Notes, V. 11, P. 193-211.