

Revisión del modelo geometalúrgico para la estimación de recursos minerales en depósitos pórfido cupríferos

Review of the geometallurgical model for the estimation of mineral resources in porphyry copper deposits

Nelson Jesús Ramos Armijos¹, Julia Marilú Calderón Celis²

Recibido: 19/04/2022 - Aprobado: 29/09/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

El modelo geometalúrgico es una herramienta que permite evaluar la variabilidad de los depósitos minerales desde el punto de vista geológico, de procesamiento y producción. Con ello es posible estimar el valor actual neto más realista y reducir significativamente el riesgo técnico-operacional que se presenta en las etapas de factibilidad de un proyecto minero. En la presente investigación se ha realizado una búsqueda exhaustiva sobre estudios enfocados a modelamiento geometalúrgico en depósitos pórfido cupríferos en los cuales se ha estimado y simulado como variables geometalúrgicas la ley de cobre total, cobre oxidado, elementos penalizantes, recuperación metalúrgica, índice de trabajo y de abrasión. A través de esta investigación se evidencia que al incorporar atributos geometalúrgicos en la estimación de recursos minerales es posible cuantificar de mejor forma la variabilidad espacial del depósito, prever aquellos minerales que interfieran en el tratamiento metalúrgico y valorar la probabilidad de cada destino para los bloques minerales en el procesamiento.

Palabras claves: Modelo geometalúrgico, estimación de recursos, variables geometalúrgicas, pórfido cuprífero, simulación, programas geometalúrgicos.

ABSTRACT

The geometallurgical model is a tool that allows evaluating the necessity of mineral deposits from the geological, processing and production point of view. With this, it is possible to estimate the most realistic net present value and significantly reduce the technical-operational risk that occurs in the feasibility stages of a mining project. In the present investigation, an exhaustive search has been carried out on studies focused on geometallurgical modeling in porphyry copper deposits in which it has been estimated and simulated as geometallurgical total copper grade, oxide copper, penalizing elements, metallurgical recovery, bond work index and of abrasion. Through this research, it is evident that by incorporating geometallurgical attributes in the estimation of mineral resources, it is possible to better quantify the spatial variability of the deposit, anticipate those minerals that interfere in the metallurgical treatment and evaluate the probability of each destination for the mineral blocks in processing.

Keywords: Geometallurgical model, resource estimate, geometallurgical variables, copper porphyry, simulation, geometallurgical programs.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú
Ingeniero de Minas, Maestría en Geometalurgia.

Autor para correspondencia: nelson.ramos1@unmsm.edu.pe, nramos_5215@hotmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9188-6422>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú

E-mail: jcalderond2@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-9307>

I. INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta importantes desafíos derivados de problemas técnico – económicos (V. Lishchuk & Pettersson, 2021) que se asocian a la incertidumbre geológica de los yacimientos (Mohammadi et al., 2021) además de dificultades en el procesamiento mineral (Mwanga et al., 2015) impuestas por la variabilidad mineralógica y propiedades de la roca (Montiel & Dimitrakopoulos, 2015) que se han convertido en parámetros críticos hacia una minería sostenible y sustentable en el tiempo (Egaña et al., 2020). Algunas de estas propiedades son la ley mineral, dureza de la roca, chancabilidad, consumo de reactivos y recuperación que corresponden a atributos geometalúrgicos los cuales se distribuyen de forma variable en un depósito e influyen en el procesamiento mineral (Köken & Özarlan, 2018). Cuando esta variabilidad no se cuantifica espacialmente en etapas tempranas de la exploración (V. , Lishchuk et al., 2016), dada la escasa información geometalúrgica disponible (Garrido et al., 2020), existe un mayor riesgo del proyecto (Abildin et al., 2019) una potencial pérdida de ingresos y, además, no permite tomar decisiones críticas sobre la operación del yacimiento (Navarra et al., 2018) y su desempeño económico, lo cual limita la capacidad del ente encargado de la planificación minera (Lang et al., 2018).

Al respecto se han realizado investigaciones referentes a modelamiento y estimación geometalúrgica en depósitos pórfido cupríferos, caracterizados por sus sistemas geológicos complejos y que exhiben variabilidad (Ranjbar et al., 2021) en sus propiedades de procesamiento, tales como dureza, molienda, flotabilidad, lixiviabilidad (Hosseini & Asghari, 2015a), (Khorram et al., 2020) elaboraron la estimación de recursos geometalúrgicos bajo un enfoque geoestadístico modificado en el depósito pórfido cuprífero de Sungun en Irán a través del algoritmo basado en el método de acondicionamiento uniforme localizado (LUC) y de simulación directa de bloques (DBSIM). (Hosseini & Asghari, 2015b) en el mismo depósito

mineral aplicaron transformación condicional escalonada y simulación secuencial gaussiana para estimar ley de cobre total y de óxido (Castro et al., 2020) desarrollaron modelos geometalúrgicos en la unidad minera Cerro Corona en Perú sobre el yacimiento tipo pórfido de cobre – oro , que incluyó litología, dureza del mineral, recuperación de cobre y ley de elementos penalizantes (Harbort et al., 2011) elaboraron modelos geometalúrgicos de flotación y recuperación el depósito pórfido de cobre-oro Zafranal en Perú.

La importancia del modelo geometalúrgico para optimizar el valor actual neto (Dominy et al., 2018) y reducir el riesgo técnico – operativo del proyecto minero (Navarra et al., 2018) requiere de metodologías para estimar variables geometalúrgicas, lo que permita acertar de forma objetiva con el plan que maximice la producción en un período definido previamente (Beaumont & Musingwini, 2019).

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es presentar casos de estudio en los cuales se ha implementado el modelo geometalúrgico para estimar recursos minerales en depósitos tipo pórfidos.

1.1. Modelo geometalúrgico

El modelo geometalúrgico proporciona información sobre la variabilidad del depósito en términos de rendimiento del procesamiento mineral a lo largo de la cadena de valor de la minería (Hunt & Berry, 2017) el cual se construye identificando propiedades geológicas, físicas, mineralógicas, químicas del mineral y vincularlas con las propiedades del proceso (Gomes et al., 2016).

1.1.1. Variables geometalúrgicas

Se conoce como variables geometalúrgicas a cualquier propiedad de la roca que tiene un efecto positivo o negativo en el valor del recurso mineral (Coward et al., 2008) y se clasifican en: primarias y de respuesta (Figura 1).

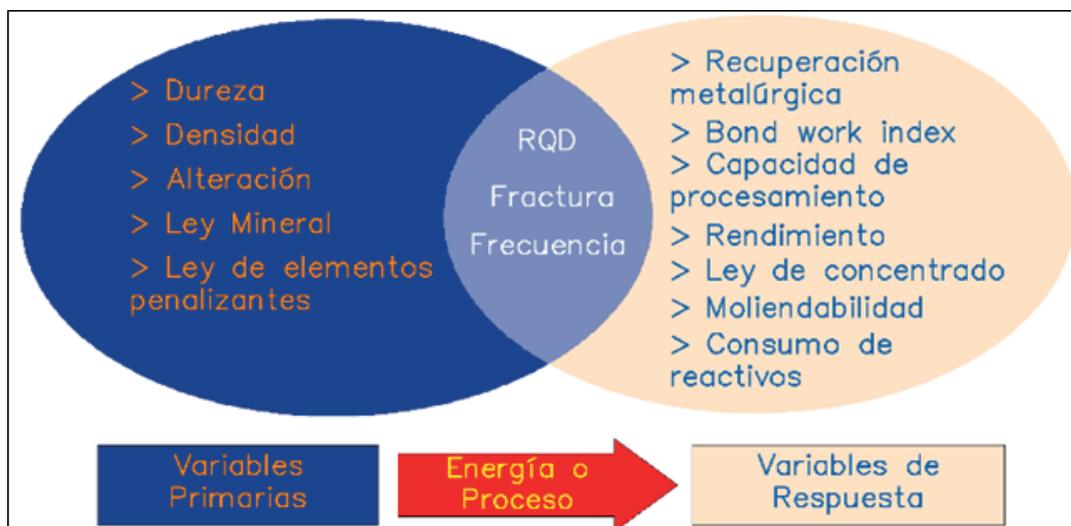


Figura 1. Esquema de variables primarias y de respuesta metalúrgica (Dunham & Vann, 2007)

Las variables primarias son atributos intrínsecos de la roca que pueden ser medidos directamente, por ejemplo: dureza, densidad, alteración, ley mineral, ley de elementos penalizantes; y usualmente se utilizan para la predicción de la respuesta metalúrgica. La mayoría de estas variables son aditivas (Coward et al., 2008), o se manejan fácilmente para que se traten como tal. La media de estos atributos se puede estimar mediante un promedio lineal simple, tanto a partir de un punto de vista de muestreo (compósitos), así como en el proceso de modelado de bloques.

Por otro lado, las variables de respuesta son propiedades de la roca que describen las respuestas a los procesos metalúrgicos o a la aplicación de energía, por ejemplo: recuperación metalúrgica, bond work index, índice de chancabilidad, capacidad de procesamiento, ley de concentrado, moliendabilidad, consumo de reactivos. Debido a su naturaleza multivariada (Coward et al., 2008) las distribuciones resultantes de los datos medidos pueden ser complejas (no normales, negativamente sesgadas, bimodales) y, por lo tanto, no se pueden combinar fácilmente ni los promedios aritméticos producirán una estimación válida del resultado de la combinación de varias muestras o bloques (Coward et al., 2008).

El objetivo de la geometalurgia radica en estimar variables primarias y de respuesta en modelos de bloques. Sin embargo, en algunos casos no se pueden promediar linealmente ya que la propiedad que permite calcular la media de algunas variables mediante un promedio lineal simple es la aditividad (Coward et al., 2008). Para promediar los valores de un atributo sin generar sesgos, se debe asegurar que el atributo que se está tratando sea aditivo; lo cual es adecuado para el promedio aritmético simple y otras combinaciones lineales, como los promedios ponderados (Kriging). No obstante, usar estimadores que asumen aditividad para atributos no aditivos generarán resultados potencialmente sesgados (Vann & Guibal, 2000). Las variables de respuesta (atributos no aditivos) suelen ser complejas y típicamente no lineales, ya sea a través

de alguna relación categórica o mediante una fórmula no lineal (Figura 2).

La no aditividad implícita de las variables de respuesta se ilustra a través de la desigualdad de Jensen (Hastings et al., 2005). Como se indica en la Figura 2, cuando la relación entre dos variables no es lineal, un promedio lineal simple sobreestimarás o subestimarás el valor real.

1.2. Programas geometalúrgicos

El programa geometalúrgico es una aplicación industrial que consiste en acciones continuas para aumentar el conocimiento sobre la variación del cuerpo mineral (propiedades geológicas), sus efectos en el procesamiento mineral y su uso en la planificación y gestión de la producción (V. Lishchuk, 2016). La elaboración de este programa (Tabla 1) se desarrolla a través de la metodología "PREP" (Primary Resource Efficiency for Enhanced Prediction) (Figura 3 y Tabla 2).

1.3. Minería cuprífera peruana

Perú es el segundo productor y exportador de cobre a nivel mundial, sustentando gran parte de su desarrollo sobre la base de esta industria (Larios-Meño et al., 2021). A julio de 2022 la producción cuprífera ha sido de 195,234 TMF y la producción acumulada a la fecha indicada de 1,291,888 TMF (Figura 4a) (MINEM, 2022). A nivel empresarial, Compañía Minera Antamina S.A continúa siendo la principal productora de cobre con una intervención de 21.1%, Sociedad Minera Cerro Verde S.A representó el 20.3% de la intervención total (Figura 4b) y por su parte Southern Perú Copper Corporation con un 14.1% (MINEM, 2022). A nivel regional, Áncash conservó el primer puesto aportando con el 21.3% de la producción cuprífera, seguido por Arequipa con el 20.5% y Junín con el 10.5% del total (MINEM, 2022).

Referente a las exportaciones cupríferas en junio de 2022 fue de US\$ 1,971 millones, logrando el valor más alto en el año (Figura 5a), con una variación positiva del

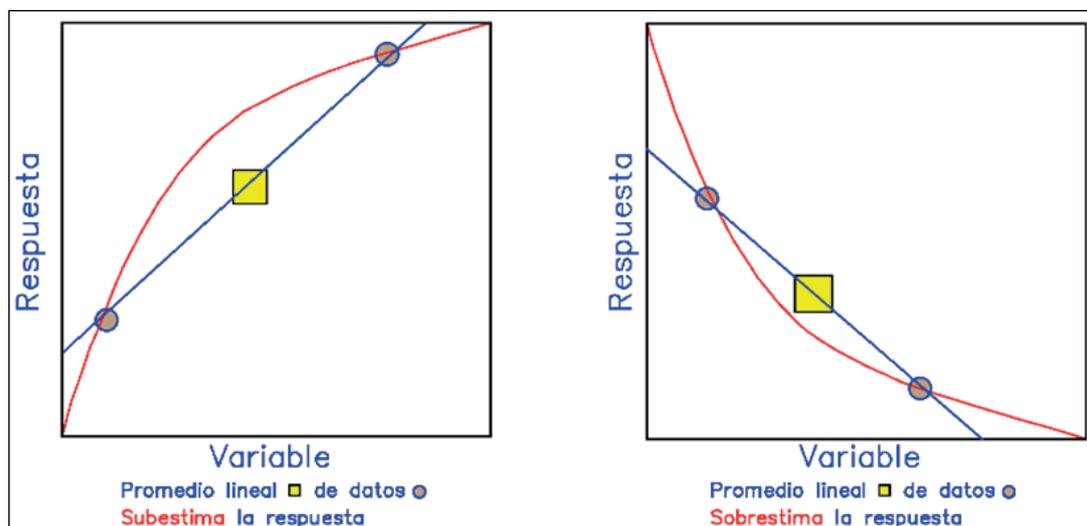


Figura 2. Desigualdad de Jensen (Coward et al., 2008)

Tabla 1. Descripción de Enfoque PREP para el desarrollo de un programa geometalúrgico

Fases	Herramientas	Descripción
Fase I: Pre – ejecución Se realiza antes de que se inicie el trabajo real de muestreo y prueba	Planificación	La planificación tiene como objetivo definir los recursos necesarios para establecer un programa geometalúrgico e incluye los siguientes pasos: 1) Seleccionar las dimensiones 2) Definición de requisitos para cada dimensión (tipos de modelos, estructura de datos) 3) Planificación de trabajos de prueba, a través de cuatro fuentes de datos: Pruebas metalúrgicas a escala de laboratorio Ensayos de variabilidad (geometalúrgicos) Pruebas en plantas piloto Observaciones de plantas 4) Planificación de caracterización mineral 5) Planificación estratégica de muestreo, incluidos los tamaños de las muestras de mineral y el número de muestras
	Pruebas previas	Permiten el conocimiento básico del material recopilado
	Datos geológicos	Contienen información litológica, química y estructural del cuerpo mineralizado
Fase II: Ejecución	Muestreo	El programa de muestreo geometalúrgico debe considerar las implicaciones de la masa mínima de muestras requeridas para las pruebas metalúrgicas. Las estrategias de muestreo incluyen: 1) la matriz geometalúrgica, cuyo objetivo es facilitar el dominio al clasificar las muestras por tipo de roca, mineralización y alteración; 2) el marco de respuesta primaria que vincula atributos de roca directamente medibles y atributos de roca que describen las respuestas en el proceso
	Pruebas	El propósito de las pruebas geometalúrgicas (Tabla 2) consiste en estudiar la variabilidad en las respuestas del proceso y correlacionarse con las escalas de laboratorio, piloto o en planta de proceso
	Caracterización Mineralógica	* Mineralogía cualitativa: Microscopía óptica, Difracción de rayos X. * Mineralogía cuantitativa: 1) Análisis mineralógico automatizado; p. ej. Evaluación cuantitativa de minerales mediante microscopio electrónico de barrido “QESMCAM”; 2) Analizador de minerales integrado “TESCAN”
	Análisis químicos de elementos	1) Espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF); 2) Espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP – OES)
Fase III: Modelado Los modelos predictivos pueden ser genéricos para describir la variabilidad a través de todo el depósito, o específicos para cada dominio geológico/geometalúrgico y, por lo tanto, describir la variabilidad dentro de cada dominio por separado	Modelado de procesos	La entrada del modelo de procesos puede provenir de leyes elementales, propiedades mineralógicas o pruebas geometalúrgicas. Dependiendo de la fuente de los datos de entrada, el modelado se puede clasificar en tradicional, mineralógico o proxy. Por ejemplo, los resultados cuantitativos obtenidos mediante ensayos químicos como “XRF” se utilizarán principalmente para modelos tradicionales; los resultados de mineralogía automatizada son útiles para los modelos mineralógicos; y la combinación de métodos de análisis químicos junto con pruebas geometalúrgicas se pueden emplear para modelos proxy
	Simulación	La simulación de variables geometalúrgicas es una práctica trascendental para investigar escenarios de producción alternativos y estimar los riesgos de producción en la industria minera. Actualmente existen múltiples soluciones para la simulación geometalúrgica, mismas que se detallan a continuación: * Simulador CEET, FLEET: Útil para el procesamiento de minerales (molienda y flotación). Funciona con modelo de bloques * JKTech’s, JKSimBlast, JKSimMet y JKSimFloat: Para geología – minería (modelo de bloques, producción minera, perforación y voladura) y procesamiento de minerales (chancado, molienda, flotación) * SGeMS: Para simulación geológica y geoestadística. Trabaja con modelo de bloques * MODSIM: Para simulación de diagramas de flujo, procesamiento de minerales (trituración, molienda, flotación, separación por gravedad, separación magnética)
	Modelado espacial	Corresponde al modelamiento y estimación de entradas geológicas y/o respuesta metalúrgica a través de un modelo de bloques (Figura 3). Cada bloque puede almacenar información geológica, composición química de elementos, características geotécnicas y/o geomecánicas, propiedades metalúrgicas y otra información relevante. Los paquetes de softwares que pueden emplearse para este fin son Leapfrog, Vulcan, Surpac, Datamine

Fuente (V. Lishchuk, 2016)

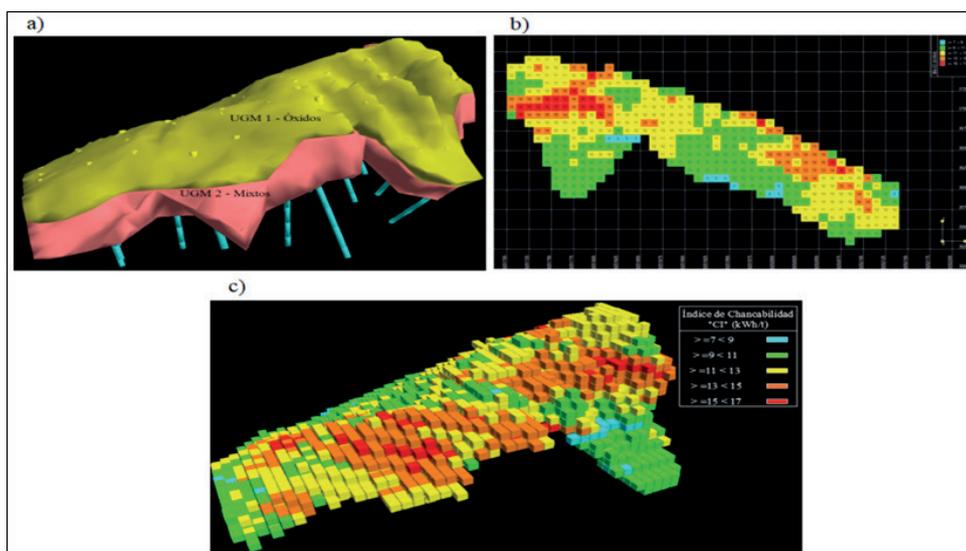
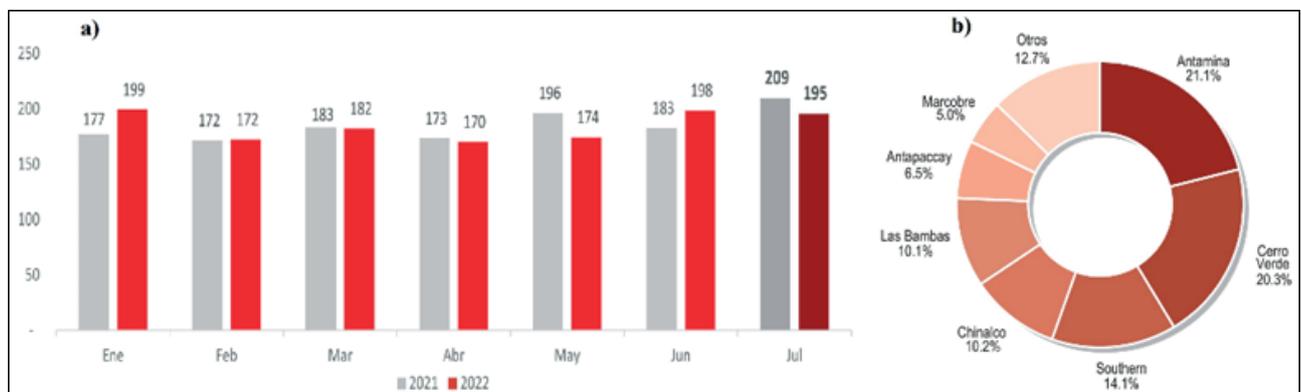


Figura 3. a) Modelado espacial de unidades geometalúrgicas (UGMs) para Óxidos y Mixtos en un depósito pórfido cuprífero. b) y c) Modelo de bloques y estimación para variable geometalúrgica “Índice de Chancabilidad” bi y tridimensionalmente en zona de Óxidos.

Tabla 2. Listado de pruebas geometalúrgicas

Proceso	Recomendación	Ensayo metalúrgico	Equipo de escala de producción correspondiente
Molienda	Prueba de Conminución Geometalúrgica "GCT", Índice de Trituración "GeMCI", Prueba de Índice de Potencia MinnovEX SAG (SPI), Prueba de Trituración en Molino "SMC"	Prueba de triturabilidad	Molinos autógenos (AG) y semiautógenos (SAG), molino de bolas, trituradoras, molino ISA, Vertimill
Clasificación de minerales	N/A	Prueba de clasificación	Clasificador de minerales (XRT, hiperspectral, láser)
Flotación	Indicador de separabilidad de minerales Julius Kruttschnitt "JKMSI", Microflotación, Prueba de Agitación	Prueba de flotación convencional	Celdas convencionales de flotación por aire forzado y autoaspirantes, celdas de flotación neumáticas
Separación magnética/eléctrica	Tubo Davis, Separador Frantz	Separador de laboratorio de alta tensión, separador magnético de baja intensidad seco y húmedo (LIMS), separador magnético de laboratorio seco y húmedo de alta intensidad (HIMS)	Separadores magnéticos y eléctricos de baja y alta intensidad secos y húmedos
Separación por gravedad	Separador de laboratorio de Mozley, prueba de oro recuperable por gravedad "GRG"	Mesa vibratoria, concentradores en espiral	Separador Knelson, mesa de tres pisos, concentrador de cono Reichert
Lixiviación	Pruebas hidrometalúrgicas a pequeña escala	Prueba de lixiviación de columna, prueba de lixiviación en tanque, prueba de lixiviación granular compactada, prueba de lixiviación por dependencia del pH	Lixiviación en pilas, biolixiviación

Fuente (V. Lishchuk, 2016)

**Figura 4. a)** 2021 – 2022: Producción mensual de cobre (Miles de TMF) enero – julio. **b)** 2022: Estructura de la producción por empresas, enero – julio (MINEM, 2022)

21.0% respecto a junio de 2021 (MINEM, 2022). El valor acumulado de cobre en el primer semestre del 2022 ha sido de US\$ 10,246 millones que representa un incremento de 8.8% en contraste al primer semestre de 2021 (US\$ 9,415 millones). Además, el cobre se mantiene como el producto principal exportado con una intervención de 30.8% del total de exportaciones peruanas (MINEM, 2022). Concerniente al destino de exportaciones al mes de junio de 2022, China se mantiene como el principal demandante de cobre a nivel mundial con una participación de 70.4% del total exportado (Figura 5b), seguido por Japón con el 6.7% y Corea del Sur con 5.3% (MINEM, 2022).

En Perú los yacimientos tipo pórfido cupríferos caracterizados por su gran tonelaje, baja ley y forma irregular (Tumialán De la Cruz, 2003), se distribuyen en los siguientes ambientes geológicos: en la franja SE del Batolito de la Costa, se ubican los pórfido cupríferos de Quellaveco, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Cerro Negro y Santa Rosa (Tumialán De la Cruz, 2003). En la Franja Sedimentaria Mesozoica de la Cordillera Occidental en el departamento de Cusco se localiza Antapacay; en el departamento de Junín, Toromocho; en el departamento de

Apurímac, Los Chancas; en el departamento de Cajamarca La Granja, Galeno, Minas Conga, Michiquillay, Cerro Corona; en el departamento de Áncash, El Águila, Pashpap; en el departamento de Piura, Río Blanco (Tumialán De la Cruz, 2003).

II. MÉTODOS

2.1. Tipo de estudio

El enfoque del estudio es cualitativo. El tipo de la investigación es aplicada y el diseño es no experimental de tipo revisión documental. En cuanto al nivel es descriptivo y explicativo.

2.2. Fuentes de información y estrategias de búsqueda

Se realizó una búsqueda exhaustiva de investigaciones relacionadas a modelamiento y estimación geometalúrgica en depósitos pórfido cupríferos en publicaciones relevantes revisadas por pares e indexadas en las principales bases de datos de investigación científica. Se utilizó palabras claves en idioma inglés y se creó la cadena de búsqueda

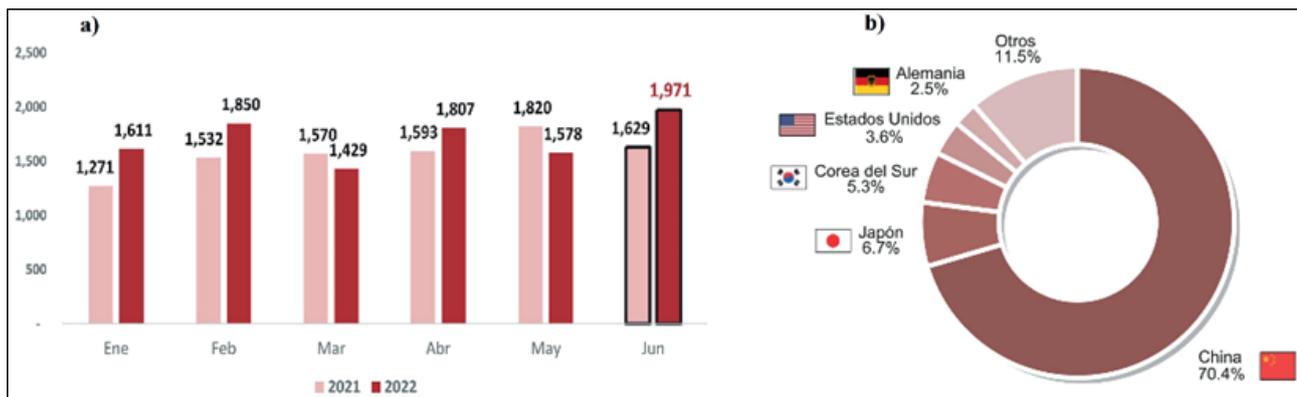


Figura 5. a) Valor de las Exportaciones de cobre (Valor FOB en millones de US\$). b) 2022: Destino de las Exportaciones de Cobre (enero – junio) (MINEM, 2022)

utilizando el operador booleano AND. Como resultado la cadena de búsqueda fue: “mineral resource estimate AND geometallurgical model”, “rock strength AND bond work index”, “geometallurgical model AND porphyry copper deposits AND oxide copper grades”. Además, se empleó información disponible en el Ministerio de Energía y Minas del Perú.

2.3. Selección de la información

Los artículos y documentos duplicados fueron eliminados según el título. Luego se revisó el resumen de aquellos potencialmente elegibles y se evaluaron de acuerdo con los siguientes criterios de inclusión:

- Artículos en idioma inglés e información relevante a minería cuprífera peruana.
- Investigaciones enfocadas a modelamiento y estimación geometalúrgica en depósitos tipo pórfidos.
- El período de búsqueda para la información ha sido entre los años 2011 a 2021.

III. RESULTADOS

3.1. Modelamiento geometalúrgico de leyes de Cu y CuO en el depósito pórfido de Sungun

El depósito pórfido cuprífero de Sungun es una de las principales fuentes de la cual se extrae cobre en Irán. Está ubicado en la provincia de Azerbaiyán a 100 km al NE de la capital Tabriz (Figura 6a). El emplazamiento de Sungun tuvo lugar en varios pulsos intrusivos asociados con actividad hidrotermal (A. Hezarkhani, 2006). La alteración hidrotermal temprana fue predominantemente potásica y propilitica, y seguida por una alteración filica y argílica posterior (A. Hezarkhani & Williams-Jones, 1998). Las rocas asociadas al yacimiento son de tipo ígneas intrusivas y extrusivas, diques andesíticos, rocas carbonatadas (Figura 6b). En el depósito se distinguen las siguientes zonas de mineralización: enriquecimiento supergénico (conformada por zona oxidada y lixiviada) y zona hipógena (Figura 7a) (Soltani et al., 2014). La mineralización hipogénica de cobre

se formó probablemente durante las alteraciones potásica y filica (Figura 7b) (Khorram et al., 2020). En la alteración potásica, la mineralización de cobre se depositó como calcopirita junto con bornita (sulfuros primarios). Estos a su vez se disolvieron mediante procesos supergénicos y se reemplazaron por minerales secundarios.

En los depósitos pórfido cupríferos, el mineral de cobre a menudo se compone de dos partes principales que incluyen minerales de óxidos y sulfuros de cobre, siendo el tratamiento metalúrgico en estos minerales distinto (Khorram et al., 2020). La flotación se utiliza para los sulfuros, mientras que la lixiviación en pilas se emplea para tratar a los óxidos. Los parámetros esenciales que controlan los procesos de lixiviación y flotación son los componentes de cobre total y de óxido / sulfuro del mineral (Emery, 2012). Tanto las leyes de cobre total como las de óxido deben considerarse en el diseño y planificación de la mina, así como también en el procesamiento del mineral (Shayestehfar et al., 2008). Sin embargo, la restricción mineralógica relacionada con el cobre total (Cu) y las leyes de óxido (CuO) es un desafío que a menudo hace que el modelado conjunto y la simulación de atributos sean más complejos (Khorram et al., 2020), ya que, las variables geometalúrgicas “Cu” y “CuO” son no aditivas y los métodos lineales no son apropiados al evaluarlas. Para simplificar una simulación conjunta compleja, (Khorram et al., 2020) y (Hosseini & Asghari, 2015a) con base en sondajes exploratorios elaboraron la estimación de recursos y simulación de variables geometalúrgicas respectivamente.

3.2. Geometalurgia operativa en la Unidad Minera Cerro Corona

Cerro Corona es una operación a cielo abierto localizada en Perú, provincia de Hualgayoc (Figura 10a). El yacimiento es tipo pórfido de cobre–oro asociado a un stock de composición diorítico a cuarzo– diorítico (Figura 10b), que intruyó a las formaciones Yumagual y Pariatambo (Uzategui et al., 2016).

El yacimiento presenta cuatro zonas mineralizadas. La primera lixiviada con minerales oxidados de hierro, oro libre (zona de oxidación) y la segunda infrayacente con

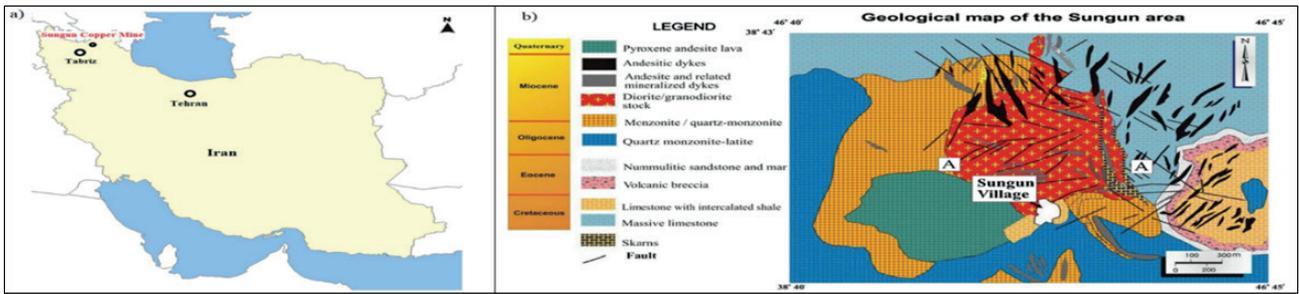


Figura 6. a) Mapa de ubicación (Ranjbar et al., 2021) ; b) Mapa geológico de Sungun (Hosseini & Asghari, 2015a)

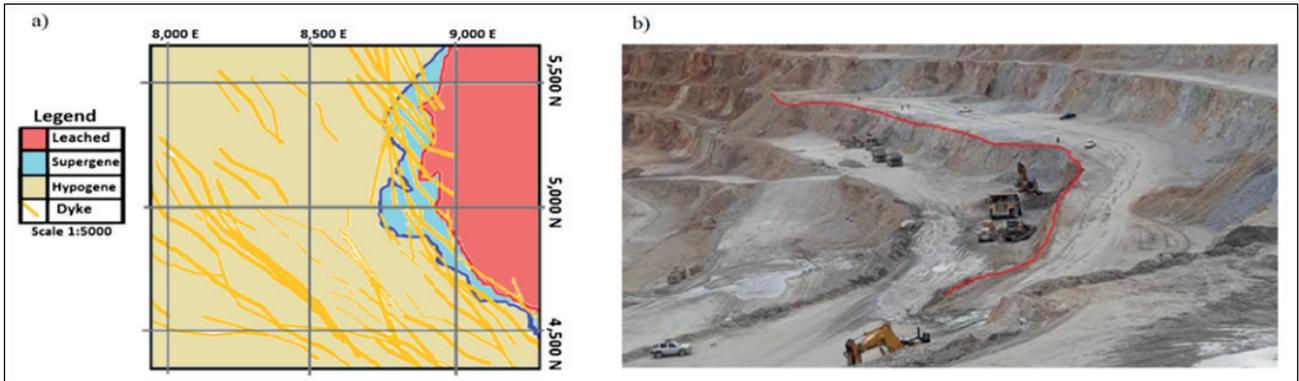


Figura 7. a) Zonas de mineralización en el depósito pórfido cuprífero de Sungun (Khorram et al., 2020). b) Banco de explotación en el yacimiento de Sungun en zona de alteración filica (Ranjbar et al., 2021)

Tabla 3. Descripción de estimación de recursos y simulación de variables geometalúrgicas en depósito pórfido cuprífero de Sungun

Estimación de recursos geometalúrgicos utilizando un enfoque geoestadístico modificado, un estudio de caso del depósito pórfido cuprífero de Sungun (Khorram et al., 2020)		Simulación de variables geometalúrgicas mediante transformación condicional escalonada en el depósito de cobre de Sungun, Irán (Hosseini & Asghari, 2015a)													
Variables geometalúrgicas utilizadas	Ley de cobre total (Cu) Ley de cobre oxidado (CuO)	Variables geometalúrgicas utilizadas	Ley de cobre total (Cu) Ley de cobre oxidado (CuO)												
Metodología empleada	<p>1) Método de Acondicionamiento Uniforme Localizado (LUC): Es una técnica geoestadística no lineal para estimar el tonelaje de la mineralización y la ley que se recupera utilizando el tamaño del bloque, y, además, calcular la curva tonelaje – ley para los bloques grandes (paneles). Es utilizado cuando los datos son escasos y se encuentran muy separados en comparación a la unidad de minado selectivo (SMU). Este método divide los paneles en pequeños bloques y los clasifica en orden creciente de leyes</p> <p>2) Simulación Directa de Bloques (DBSIM): Es útil para modelar y mediante realizaciones clasificar los bloques dentro de un panel</p>	Metodología empleada	<p>1) Transformación Condicional Escalonada (SCT): Es una técnica geoestadística que transforma múltiples variables en gaussianas univariadas y multivariadas sin correlación cruzada, lo cual facilita la simulación de múltiples variables con relaciones arbitrariamente complejas. En este caso se utilizó SCT para generar variables gaussianas multivariadas de los atributos geometalúrgicos Cu y CuO. Debido a que los valores de Cu fueron más continuos en comparación con el CuO se eligió a Cu como variable primaria y la ley de CuO se transformó condicionalmente a la ley de Cu</p> <p>2) Simulación Secuencial Gaussiana (SGS): Es un algoritmo de modelado estocástico que obtiene múltiples realizaciones basadas en los mismos datos de entrada, los cuales pueden ser continuos o categóricos. En este caso se utilizó para simular variables transformadas condicionalmente por pasos</p>												
Resultados	A través de las metodologías empleadas establecieron dominios geometalúrgicos en el modelo de bloques, estimando las leyes de Cu (Figuras 8a, 8c) y de CuO (Figuras 8b, 8d) conjuntamente al destino más probable del modelo de cada bloque (Figuras 8e, 8f): flotación, lixiviación y vertedero	Resultados	<p>Las realizaciones de la ley de Cu y CuO se utilizaron para la planificación y toma de decisiones en mina. Suponga que cada bloque extraído puede tener tres destinos posibles: flotación, si Cu es mayor al 0.2% y la relación de solubilidad es inferior al 70%; vertedero si la ley de Cu es inferior al 0.2% y lixiviación en pilas de lo contrario. Aunque el contenido de cobre encerrado en la elipse (Figura 9b) está destinado para flotación, el hecho de que la mayor parte del cobre en esta zona se encuentra en forma de óxido requiere que se cambie el destino de los bloques al proceso de lixiviación en pilas (Figura 9c). De acuerdo con el estudio realizado las leyes medias estimadas para cada posible destino se detallan a continuación:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Destino</th> <th>Flotación</th> <th>Lixiviación en Pilas</th> <th>Vertedero</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ley media de Cu (%)</td> <td>0.6201</td> <td>0.6045</td> <td>0.0555</td> </tr> <tr> <td>Ley media de CuO (%)</td> <td>0.0650</td> <td>0.4389</td> <td>0.0109</td> </tr> </tbody> </table>	Destino	Flotación	Lixiviación en Pilas	Vertedero	Ley media de Cu (%)	0.6201	0.6045	0.0555	Ley media de CuO (%)	0.0650	0.4389	0.0109
Destino	Flotación	Lixiviación en Pilas	Vertedero												
Ley media de Cu (%)	0.6201	0.6045	0.0555												
Ley media de CuO (%)	0.0650	0.4389	0.0109												

Fuente: (Khorram et al., 2020) y (Hosseini & Asghari, 2015a)

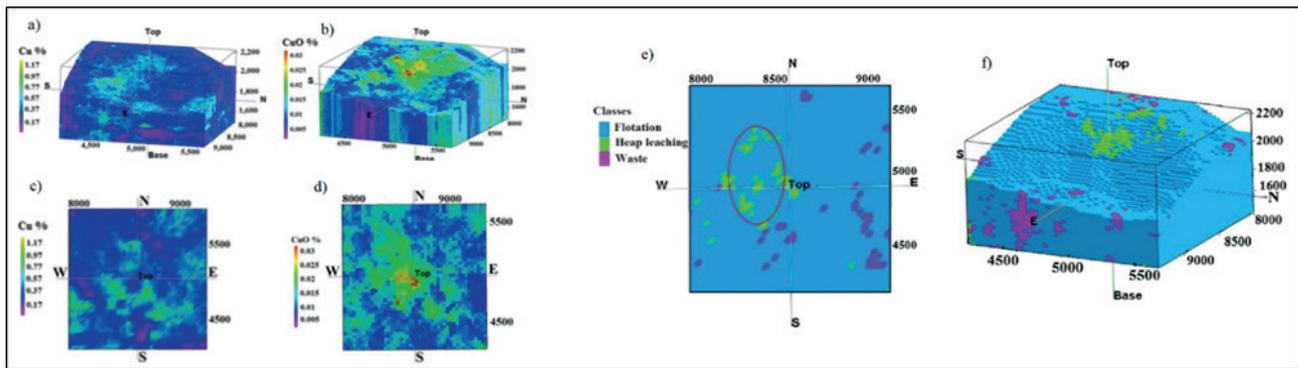


Figura 8. a) y b) Modelado 3D de Cu y CuO. c) y d) Modelado 2D de leyes de Cu y CuO estimadas a una altura de 1850 m. e) y f) Destino más probable de cada bloque a una altura de 1820m (Khorram et al., 2020)

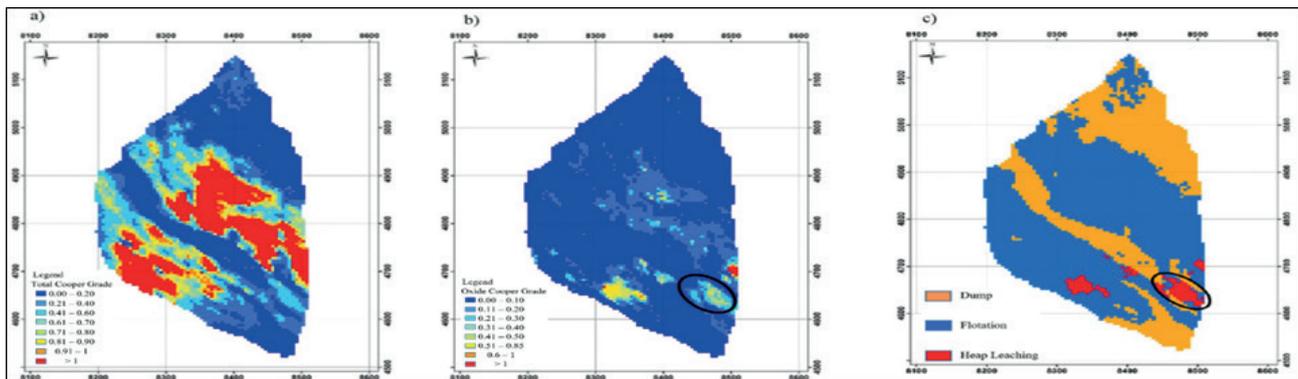


Figura 9. a) y b) Mapas de leyes de Cu y CuO (promedio de 70 realizaciones) a una altura de 2150m. c) Destino de tratamiento metalúrgico probable para los bloques minerales a una altura de 2150m (Khorram et al., 2020)

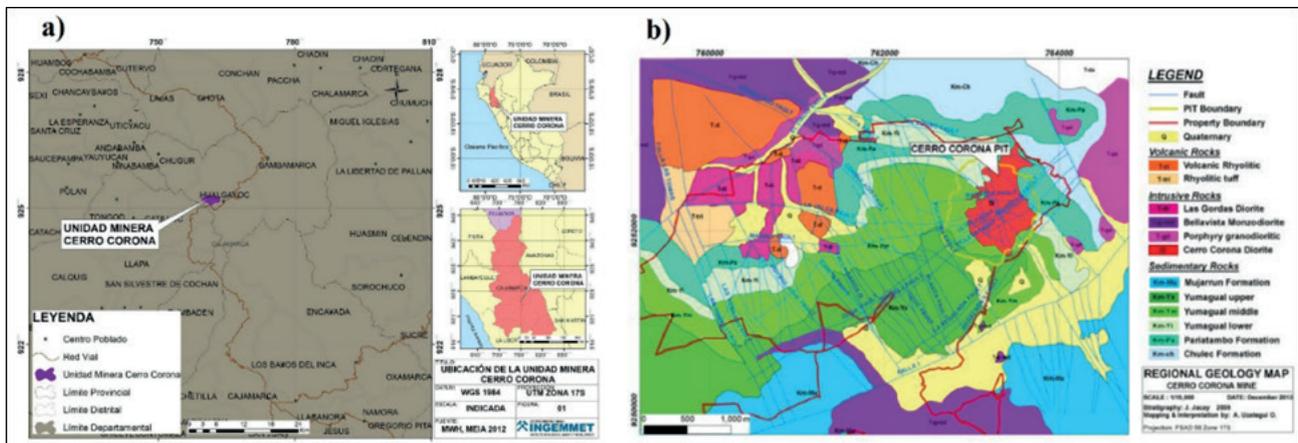


Figura 10. a) Ubicación (INGEMMET, 2019). b) Geología Regional del yacimiento (Uzátegui Obando, 2016)

minerales supérgenos de cobre (Uzátegui Obando, 2016). La zona mixta está compuesta por calcosina, digenita y por debajo se sitúa la zona hipógena con calcopirita, bornita, molibdenita, magnetita, pirita; las alteraciones minerales son potásica, fílica y argílica (Uzátegui Obando, 2016). La planta metalúrgica comprende circuito de chancado primario- secundario, molienda SABC-B y celdas de flotación para recuperar concentrado de cobre y oro (Castro et al., 2020). Las UGMs se definen en

base a: litología, mineralización, dureza, recuperación y elementos contaminantes. La recuperación de cobre está asociada a calcopirita y se emplea análisis de cobre secuencial (Figura 11a) para inferir la presencia de cobre secundario y óxidos (Castro et al., 2022) La recuperación de oro depende de la asociación de este con sulfuros; al estar asociado con calcopirita es buena; pero al estar asociado a pirita, cuarzo y arcillas no, ya que el mineral se pierde en la fase de limpieza. Además, se ha observado

que en donde el oro se asocia a piritita microcristalina y enargita (Figura 11b) la recuperación de oro es baja y presenta concentración de arsénico, que debe ser manejado adecuadamente para la comercialización. Al oeste del tajo se tienen leyes importantes de arsénico con tennantita, enargitas caracterizadas por su flotabilidad natural. Por lo tanto, en el blending mineral es de gran ayuda el modelo de concentrabilidad de arsénico (Figura 11c), ya que el valor del concentrado varía en función a este; pese a tener la enargita mayor cobre en comparación a la calcopirita y calcosina (Espinoza S. et al., 2021) el arsénico la hace un mineral penalizante.

Respecto a la dureza del mineral mientras se profundiza en el tajo, esta aumenta, sobredimensionado en la alimentación a las chancadoras (Figura 12a). Para optimizar la fragmentación se han definido configuraciones de mallas triangulares en la voladura (en función a la dureza de la roca 25-175 MPa) (J. , Castro et al., 2020).

La alimentación en la molienda son 830 tph, sin embargo, al procesar minerales competentes por alteración potásica y sílice, se logran 600 tph. La etapa de chancado se divide en primario (trituradoras de mandíbulas) y secundario (trituradora de rodillos– sizer). Para cumplir el plan de procesamiento se alimenta los minerales finos y de baja dureza en stocks (Figura 12b) para su alimentación directa al sizer y evitar el exceso de consumo de energía (J. , Castro et al., 2020).

3.3. Modelamiento geometalúrgico en el depósito pórfido cuprífero de Zafranal

El depósito pórfido de cobre-oro Zafranal (Cretácico Tardío 81 Ma) está ubicado en Perú, 153 Km al noroeste de la ciudad de Arequipa, en los distritos de Huancarqui y Lluta (Figura 13a); estando el depósito supergénico enriquecido con una capa lixiviada (espesor de 40-110m) y un manto supergénico enriquecido por debajo (espesor de

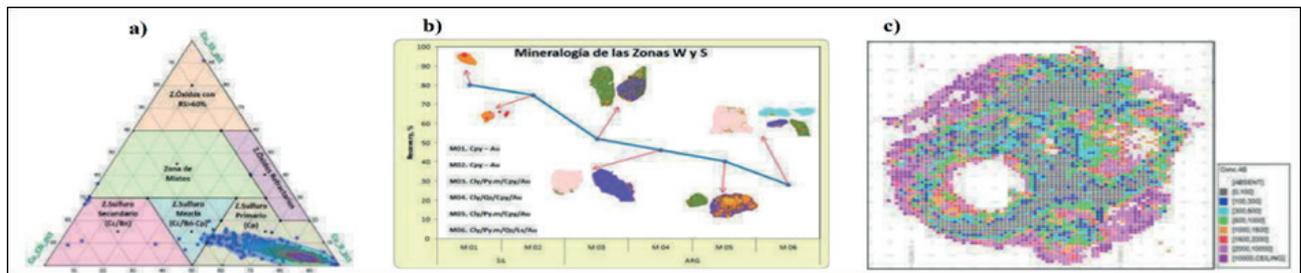


Figura 11. a) Diagrama de análisis de cobre secuencial para identificar especies de cobre. b) Especies asociadas a recuperaciones de oro. c) Distribución espacial de concentración de arsénico en el tajo (Castro et al., 2020)

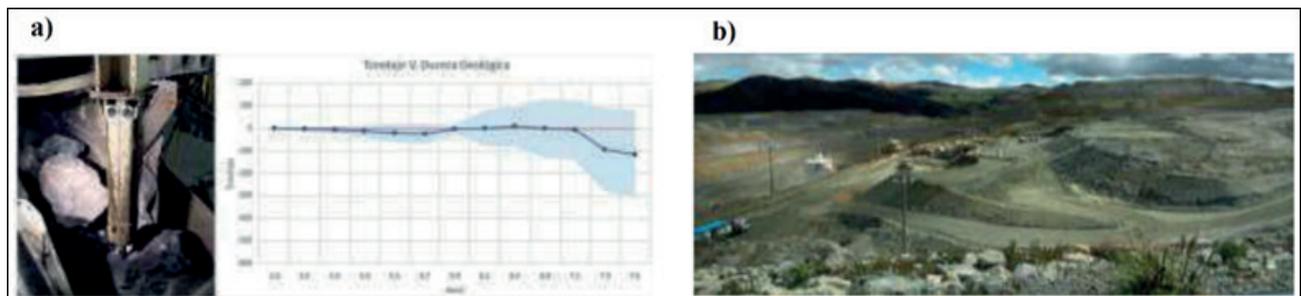


Figura 12. a) Chancadora con material sobredimensionado y gráfico de tonelaje vs competencia mecánica. b) Stocks dinámicos para disponer mineral según UGMs (Castro et al., 2020)

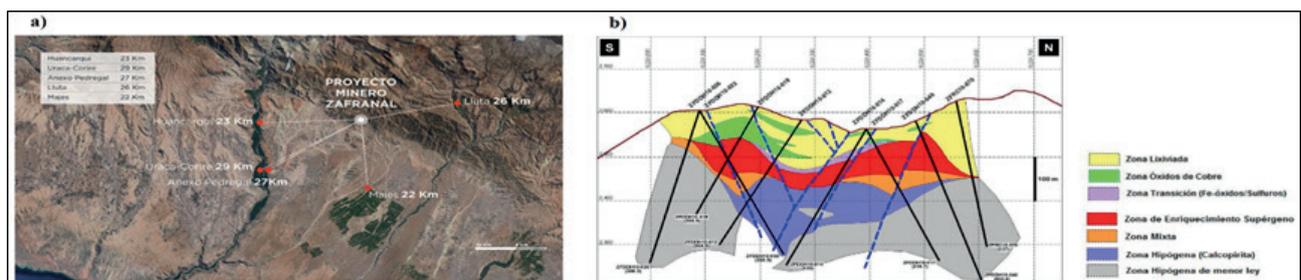


Figura 13. a) Ubicación del depósito Zafranal. b) Sección 793400 mirando hacia el oeste en donde se ilustra la mineralización del depósito Zafranal (Rivera Carrasco, 2012)

hasta 180m) e infrayacente la zona hipógena (G. , Harbort et al., 2011).

El desarrollo del modelo geometalúrgico inició en las primeras etapas del estudio del recurso. La extracción de testigos preliminar proporcionó información de mineralogía (Tabla 4), litología, alteración y el programa de pruebas geometalúrgicas se elaboró en dos fases (Tablas 5 y 6).

Las muestras (Tabla 6) fueron seleccionadas para que los dominios geometalúrgicos se evalúen en la fase 2 de pruebas y alinearse con los dominios geológicos para desarrollar modelos (Tabla 7).

IV. DISCUSIÓN

A partir de la revisión elaborada en esta investigación se evidencia que la cantidad de estudios sobre estimación geometalúrgica de recursos minerales en depósitos pórfido cupríferos es escasa, debido a que la información con la que se cuenta para estimar es limitada, como lo afirman (Garrido et al., 2020). Los resultados obtenidos corroboran que las variables geometalúrgicas relacionadas a dureza y conminución mineral muestran variabilidad conforme lo indica (Ranjbar et al., 2021) y aumentan a medida que se profundiza en los depósitos pórfido cupríferos, lo que coincide con las investigaciones realizadas por G. Harbort

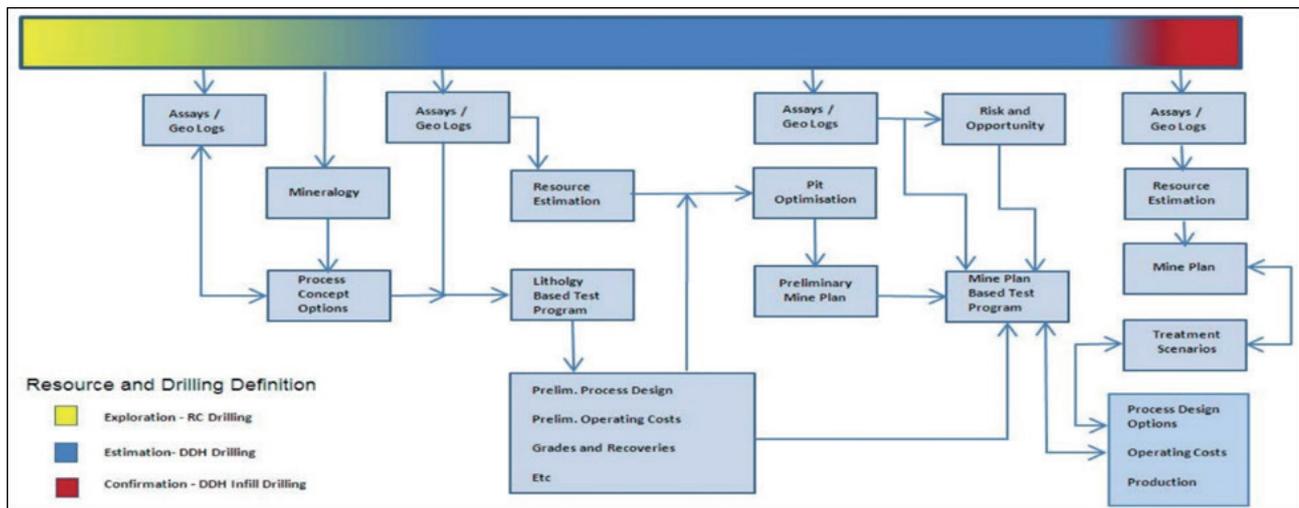


Figura 14. Diagrama de flujo del modelo geometalúrgico del depósito pórfido de Zafranal (Harbort et al., 2011)

Tabla 4. Mineralogía de mena, ganga e implicaciones potenciales en el diseño de procesos

Mineralogía de Cobre	Mineralogía de Ganga e Implicaciones Potenciales en el Procesamiento
<p>> Zona de Óxidos (50 – 70 m): con cobre de baja ley: Dominada por presencia de cloritas de cobre, goethitas de cobre y ± biotitas de cobre.</p> <p>> Transición a Zona Secundaria Enriquecida (70 m): Con calcosina como mineral de cobre dominante y las biotitas de cobre continuaron hasta los 85 m.</p> <p>> Zona Primaria: La calcopirita se presentó en menores cantidades entre los 85 y 125 m, ocasionalmente bordeada por calcosita y covelita (Figura 15)</p>	<p>> Minerales Oxidados de Hierro: Comprendiendo en gran parte goethita a los 65 m de profundidad. En una ruta de lixiviación, se espera que estos minerales tengan un impacto importante en el consumo de ácido. Mientras que, en ruta de flotación, se espera que la generación de iones férricos y la posterior precipitación de hidróxidos de hierro en superficies minerales reduzcan la cinética de flotación, con recuperaciones y leyes de concentrado reducidas</p> <p>> Silicatos (Clorita, Biotita, y Epidota): En ruta de lixiviación, el consumo de ácido en áreas con alto contenido de biotita y clorita es proporcional a la fuerza de la solución ácida. La clorita consume ácido a largo plazo y la alteración de la epidota puede aumentar drásticamente el consumo de ácido. En ruta de flotación, los reactivos utilizados para mejorar la recuperación de clorita de cobre/biotita de cobre también pueden aumentar los niveles de flotación de silicatos reactivos, lo que lleva a obtener concentrados de menor ley</p> <p>> Arcillas: Existe un elevado contenido a los 75 m de profundidad. Estos minerales presentan altas tasas de absorción de ácido y generan una permeabilidad reducida en las pilas. En la flotación provocan un uso excesivo de reactivos, escasa estabilidad en la espuma, cinética de flotación reducida y altos niveles de arrastre, con la consiguiente producción de concentrado de baja calidad</p>

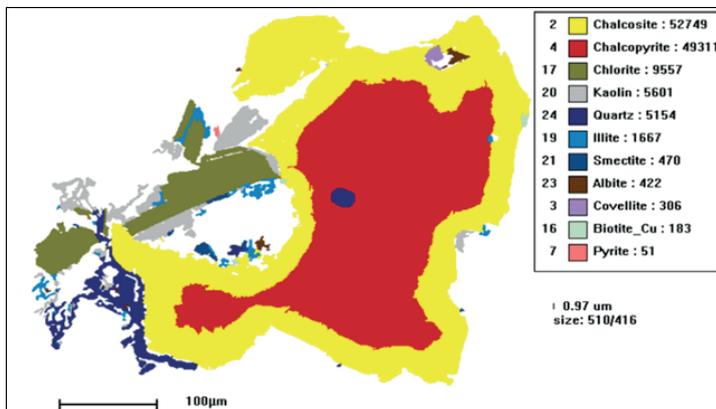


Figura 15. Calcopirita bordeada por calcosita

Fuente: (Harbort et al., 2011)

Tabla 5. Fase 1 de pruebas geometalúrgicas en el depósito pórfido Zafranal

Fase 1: La disponibilidad de testigos de perforación limitaron la cantidad de muestras disponibles para esta fase
<p>> Pruebas de Conminución: Se elaboraron 21 pruebas de conminución, que incluyeron, índice de abrasión, índice de trabajo del molino de bolas de Bond y pruebas SMC</p> <p>1) Índice de Abrasión (Ai): La zona hipógena registró valores más altos con un promedio de 0.22; la zona supérgena y de óxidos valores medios de 0.14 y 0.09 respectivamente.</p> <p>2) Índice de Trituración de Morrell: Derivado de las pruebas SMC. El material oxidado resultó moderadamente blando (percentil 80 – 4.56 kWh/t). La zona supérgena moderadamente dura (percentil 80 – 6.80 kWh/t).</p> <p>> Pruebas de Flotación: Fueron elaboradas en tres partes: 1) Ensayos para determinar condiciones óptimas de tratamiento de óxidos, supérgenos e hipógenos. 2) Pruebas de ciclo cerrado sobre material compuesto. 3) 21 ensayos de variabilidad rougher. Del análisis de variabilidad en las pruebas de flotación se tuvo lo siguiente:</p> <p>* La variación en la recuperación de cobre en especies oxidadas disueltas en ácido débil fue variable, con recuperación promedia en las muestras de óxidos de 31%.</p> <p>* La variación de la recuperación de cobre en especies de cobre soluble en cianuro (típicamente calcosita) fue moderada, con recuperación promedia de 93% tanto en muestras supergénicas como hipogénicas.</p> <p>* Los resultados de la recuperación del resto de cobre produjeron una distribución bimodal, dependiente de las otras especies de cobre presentes. En las muestras de óxido, la recuperación promedio fue del 38%, lo que indica un mineral de cobre refractario no flotante. Tanto en las muestras supergénicas como en hipogénicas, la recuperación del resto de cobre varió del 92% al 95%, lo que indica la presencia de calcopirita.</p> <p>> Pruebas de Lixiviación: Se realizaron pruebas de rodillo de botella de ácido sulfúrico de 24 horas en un material – 2 mm, en condiciones de iso-pH de 1.5. El muestreo periódico de 1, 2, 6, 12 y 24 horas midió ácido libre y cobre en solución. Después de 24 horas, la lixiviación de óxido logró una disolución de 32% del cobre total, sin embargo, se observó que una disolución del 60% de cobre soluble en ácido ofrecía una ruta de recuperación de cobre más favorable que la flotación.</p>

Fuente: (Harbort et al., 2011)

Tabla 6. Dominios geometalúrgicos y descripción de muestras de conminución, flotación y lixiviación en fase 2

Dominios Geometalúrgicos	Muestras de Conminución	Muestras de Flotación	Muestras de Lixiviación
<p>> Zona Mineral: Óxido, Supergénico, Hipogénico</p> <p>> Litología: Diorita Zafranal, Microdiorita, Volcánicas, Diorita Seca</p> <p>> Alteración: Potásica, Filica, Argílica</p>	<p>Para garantizar que las muestras de conminución cubrieran el rango de dureza de los recursos, se compararon las ubicaciones potenciales con las mediciones de garantía de calidad de la preparación de muestras de análisis de recursos. El control de calidad específico se basa en el sondaje triturado, previo a pulverizarlo para su digestión (Figura 16a)</p>	<p>Las pruebas de flotación, además de cumplir con el requisito del dominio geometalúrgico, también fueron necesarias para cubrir la distribución de la ley del recurso y la distribución del ensayo de cobre secuencial (Figura 16b)</p>	<p>Las muestras de lixiviación fueron seleccionadas en función de su contenido de cobre soluble en ácido débil y su contenido de cobre soluble en cianuro (Figura 16c)</p>

Fuente: (Harbort et al., 2011)

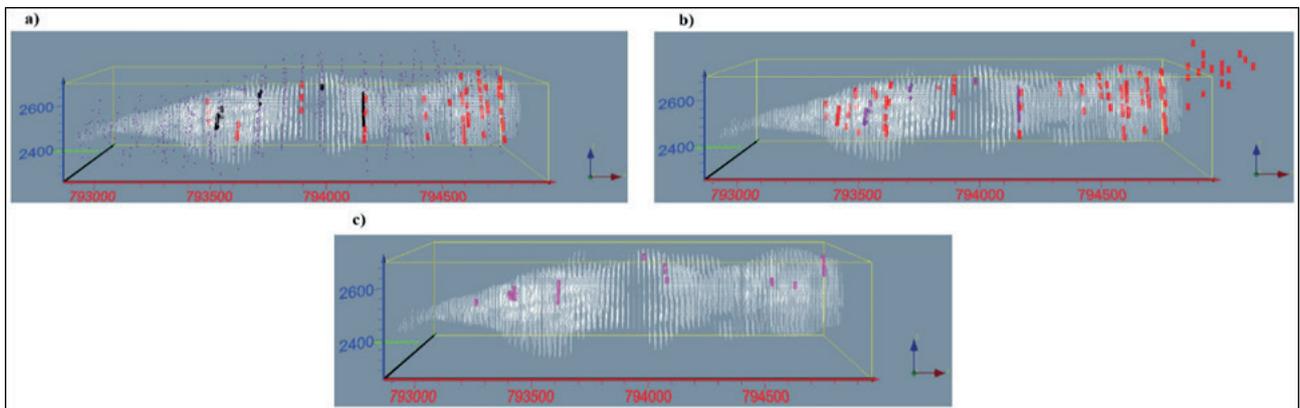


Figura 16. a) Selección de muestras de pruebas de conminución-fase 2 ()-fase 1 (). b) Selección de muestras de pruebas de flotación-fase 2 ()-fase 1 (). c) Selección de muestras de pruebas de lixivación (Harbort et al., 2011)

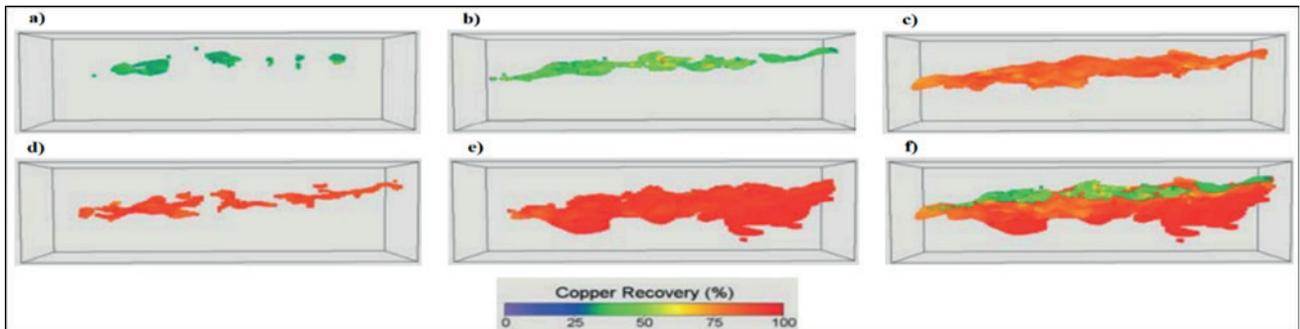


Figura 17. Modelo de recuperación de cobre en el depósito pórfido Zafranal. a) Óxidos. b) Capa Lixiviada. c) Supergénica. d) Transición. e) Hipogénica. f) Todas las zonas mineralizadas (Harbort et al., 2011)

Tabla 7. Descripción de modelos geometalúrgicos para conminución y flotación en el depósito pórfido Zafranal

Modelo Geometalúrgico de Conminución	Modelo Geometalúrgico de Flotación
<p>El modelo de conminución se basó en los resultados de las pruebas de trituración en las fases 1 y 2. Se calcularon tres componentes de trituración: energía específica del molino SAG utilizando la metodología de Morrell. El modelo de conminución asumió una función lineal multivariable, donde cada componente podría verse afectado por la profundidad, mineralización, litología y alteración. A continuación, se indica la ecuación para el índice de abrasión "Ai"</p> $A_i = (a * D) + (b * M) + (c * L) + (d * A) + (e)$ <p>D representa la profundidad de la muestra; M, L y A son enunciados lógicos que reconocen la presencia de los diversos dominios geometalúrgicos y asignan un valor entre 0 y 1, dependiendo de la presencia del dominio dentro de la muestra. Las constantes a, b, c, d y e fueron calculadas para minimizar el error de mínimos cuadrados entre los resultados de las pruebas y los resultados modelados</p>	<p>La primera etapa del modelo geometalúrgico de flotación involucró la incorporación de recuperaciones máximas en el modelo de recursos. Las pruebas de variabilidad de flotación rougher proporcionaron las máximas recuperaciones de minerales en varias leyes en la cabeza y varios ensayos de cobre secuencial. Esto indicó una función lineal multivariable, como se describe a continuación:</p> $R_{Cu(max)} = (a * WASCu) + (b * CNSCu) + (c * RemCu(1)) + (d * RemCu(2)) + (e * TotCu) + (f * Pyr) + (g)$ <p>Donde: $R_{Cu(max)}$: Recuperación máxima de cobre WASCu, CNSCu, TotCu: Son las leyes de muestras en la cabeza para cobre soluble en ácido, cobre soluble en cianuro y cobre total RemCu(1), RemCu(2): Son los ensayos de cobre restantes para la mineralogía de óxidos, supérgenos e hipógenos Pyr: Es la ley calculada en la cabeza para pirita Las constantes de "a" hasta "g" son parámetros calculados para minimizar el error entre la prueba y los resultados modelados En la Figura 17 se ilustra la recuperación de cobre en zonas minerales de óxidos, capa lixiviada, supergénica, transición e hipogénica</p>

Fuente: (Harbort et al., 2011)

et al. (2011) y J. , Castro et al. (2020) en donde señalan que a mayor profundidad en los sondeos exploratorios y del tajo abierto en producción respectivamente, se exhibe un incremento en estos atributos debido a las zonas de mineralización y además a la alteración.

Respecto a la estimación de variables no tradicionales existe un consenso entre expertos geometalurgistas (Emery, 2012) (V. Lishchuk, 2016), en que dada su condición de no aditividad como lo menciona Coward et al. (2008), es apropiado emplear técnicas geoestadísticas como la transformación condicional escalonada y simulación secuencial gaussiana utilizadas en la investigación de Hosseini & Asghari (2015a) en donde obtuvieron realizaciones para leyes de Cu y CuO, lo cual permitió reproducir de mejor forma las complejas características multivariadas de estas variables y evaluar la probabilidad del destino para cada bloque mineral en planta de procesamiento. Además, las metodologías de acondicionamiento uniforme localizado y simulación directa de bloques propuestas por Khorram et al. (2020a) son útiles para una óptima estimación del tonelaje de la mineralización y para modelar y mediante realizaciones clasificar los bloques minerales.

En cuanto a la recuperación de cobre, está restringida por la mineralogía tal cual lo indica Khorram et al. (2020) y que se constata en la investigación de Harbort et al. (2011) con su modelo geometalúrgico de flotación obteniendo óptimas recuperaciones en la zona supergénica, de transición e hipogénica. No obstante, de acuerdo con la literatura podría haber concentración de arsénico, según lo ratifica Castro et al. (2020) y debido a su flotabilidad natural es fácil concentrarse en el proceso de flotación y no existe forma de reducir el impacto de la concentración, según lo afirma Castro et al. (2022). Por lo tanto, el blending es de gran ayuda para manejar su contenido en límites permisibles.

V. CONCLUSIONES

La evidencia surgida en esta investigación refleja que el modelo geometalúrgico brinda un pronóstico preciso y confiable referente a la variabilidad de los depósitos pórfido cupríferos en términos de procesamiento y recuperación mineral considerando su incertidumbre geológica y mineralógica.

El programa geometalúrgico desde un punto de vista mineralógico requiere información cuantitativa sobre la mineralogía modal del depósito y su recopilación debe ser continua y sistemática. A través de la geometalurgia es posible mejorar la estimación y evaluación de los recursos, puesto que brinda un mejor conocimiento sobre la recuperación y procesamiento del mineral, mayor flexibilidad en la introducción de nuevas soluciones tecnológicas, menores riesgos operativos y un acceso más amplio a la optimización económica de la operación minera.

El programa de muestreo debe considerar la implicancia de la cantidad mínima de muestras requeridas para las pruebas metalúrgicas, considerando las estrategias de muestreo que incluyen clasificación de rocas por litología, mineralización y alteración; marco de respuesta primaria y atributos de la roca que describen las respuestas a un determinado proceso.

En términos de producción cuprífera peruana se evidencia que entre enero y julio del año 2022 los depósitos pórfidos han tenido una participación del 49.6%, lo que indica su importancia y lo trascendental que resulta emplear geometalurgia para maximizar el valor del yacimiento, minimizando el riesgo técnico operacional y aprovechando los recursos minerales de forma sostenible y sustentable en el tiempo.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por brindarnos salud, vida y bendecirnos cada día. Asimismo, un extensivo agradecimiento a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el espacio otorgado para la publicación de la presente investigación. A los docentes de la Unidad de Posgrado por transmitir su conocimiento e interés por esta innovadora ciencia conocida como Geometalurgia. Al Vicerrectorado de Investigación y Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por el apoyo brindado al Proyecto con Código C19160032, sin financiamiento para la publicación académica del presente artículo científico.

VII. REFERENCIAS

- Abildin, Y., Madani, N., & Topal, E. (2019). A Hybrid Approach for Joint Simulation of Geometallurgical Variables with Inequality Constraint. *Minerals* 2019, Vol. 9, Page 24, 9(1), 24. <https://doi.org/10.3390/MIN9010024>
- Beaumont, C., & Musingwini, C. (2019). Application of geometallurgical modelling to mine planning in a copper-gold mining operation for improving ore quality and mineral processing efficiency. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(3), 243–252. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/V119N3A3>
- Castro, J., Dávila, R., Torres, J., & Aramburú, V. (2022). Geometalurgia y el análisis de la data. Importancia y aplicaciones en Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(49), 211–228. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.23025>
- Castro, J., Julian, A., Ayala, E., & Becerra, G. (2020). Rol y desafíos de la geometalurgia operacional en Cerro Corona, Cajamarca, Perú. *Revista Minería*, 163–166. <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/rol-y-desafios-de-la-geometalurgia-operacional-en-cerro-corona-cajamarca-peru>
- Coward, S., Vann, J., Dunham, S., & Stewart, M. (2008). *The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables* (AusIMM, Ed.). Seventh International Mining Geology Conference 2009. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/seventh-international-mining-geology-conference-2009/the-primary-response-framework-for-geometallurgical-variables/>
- Dominy, S. C., O'connor, L., Parbhakar-Fox, A., Glass, H. J., & Purevergel, S. (2018). Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. *Minerals* 2018, Vol. 8, Page 560, 8(12), 560. <https://doi.org/10.3390/MIN8120560>
- Dunham, S., & Vann, J. (2007). Geometallurgy, Geostatistics and Project Value - Does Your Block Model Tell You What You Need to Know? In Ausimm (Ed.), *Australasian Institute of Mining and Metallurgy* (pp. 189–196). Publication Series. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/project-evaluation-2007/geometallurgy-geostatistics-and-project-value---does-your-block-model-tell-you-what-you-need-to-know/>
- Egaña, Á. F., Santibáñez-Leal, F. A., Vidal, C., Díaz, G., Liberman, S., & Ehrenfeld, A. (2020). A Robust Stochastic Approach to Mineral Hyperspectral Analysis for Geometallurgy. *Minerals* 2020, Vol. 10, Page 1139, 10(12), 1139. <https://doi.org/10.3390/MIN10121139>
- Emery, X. (2012). Co-simulating Total and Soluble Copper Grades in an Oxide Ore Deposit. *Mathematical Geosciences*, 44, 27–46. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-011-9366-1>
- Espinoza S., L. A., Iriarte D., G., Espinoza S., L. O., Gutarra B., R., Herrera M., M., Zamalloa B., J., Aramburú R., V. S., & Torres G., J. A. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 85–100. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Garrido, M., Sepúlveda, E., Ortiz, J., & Townley, B. (2020). Simulation of Synthetic Exploration and Geometallurgical Database of Porphyry Copper Deposits for Educational Purposes. *Natural Resources Research*, 29, 3527–3545. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11053-020-09692-6>
- Gomes, R. B., de Tomi, G., & Assis, P. S. (2016). Mine/Mill production planning based on a Geometallurgical Model. *Rem: Revista Escola de Minas*, 69(2), 213–218. <https://doi.org/10.1590/0370-44672015690173>
- Harbort, G., Manfrino, A., & Wright, J. (2011). Development of the Zafranal Geometallurgical Model. *1st AusIMM International Geometallurgy Conference 2011, September*, 61–71. https://www.researchgate.net/publication/289424729_Development_of_the_Zafranal_Geometallurgical_Model
- Hastings, A., Arzberger, P., Bolker, B., Collins, S., Ives, A. R., Johnson, N. A., & Palmer, M. A. (2005). Quantitative Bioscience for the 21st Century. *BioScience*, 55(6), 511–517. [https://doi.org/https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0511:QBFTSC\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0511:QBFTSC]2.0.CO;2)
- Hezarkhani, A. (2006). Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3), 326–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.04.005>
- Hezarkhani, A., & Williams-Jones, A. E. (1998). Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology | GeoScienceWorld*, 93(5), 651–670. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.5.651>
- Hosseini, S. A., & Asghari, O. (2015a). Simulation of geometallurgical variables through stepwise conditional transformation in Sungun copper deposit, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 3821–3831. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-014-1452-5>
- Hosseini, S. A., & Asghari, O. (2015b). Simulation of geometallurgical variables through stepwise conditional transformation in Sungun copper deposit, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 3821–3831. <https://doi.org/10.1007/S12517-014-1452-5>
- Hunt, J. A., & Berry, R. F. (2017). Economic Geology Models #3. Geological Contributions to Geometallurgy: A Review. *Geoscience Canada*, 44(3), 103–118. <https://doi.org/10.12789/GEOCANJ.2017.44.121>

- INGEMMET. (2019). Inspección geológica en la presa de relaves de la unidad minera Cerro Corona. Región Cajamarca, provincia Hualgayoc, distrito Hualgayoc, paraje Coymolache y Pilacones. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico*, N° A6890, 1–22. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2112>
- Khorram, F., Asghari, O., & Memarian, H. (2020). Geometallurgical resource estimation using a modified geostatistical approach; a case study of Sungun porphyry copper deposit, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(447). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-020-05327-5>
- Köken, E., & Özarslan, A. (2018). New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV). *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25, 1227–1236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12613-018-1675-7>
- Lang, A. M., Ellefmo, S. L., & Aasly, K. (2018). Geometallurgical Flowsheet as a Tool for Designing and Communicating Geometallurgical Programs. *Minerals*, 8(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min8090372>
- Larios-Meño, J. F., Mougnot, B., & Álvarez-Quiroz, V. J. (2021). Short-Run and Long-Run Effects of Copper Mining on Peru's Recent Economic Growth. *International Advances in Economic Research*, 27, 131–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11294-021-09821-8>
- Lishchuk, V. (2016). Geometallurgical programs – critical evaluation of applied methods and techniques. *Digitala Vetenskapliga Arkivet*, 1–104. <https://doi.org/978-91-7583-637-9>
- Lishchuk, V., Lamberg, P., & Lund, C. (2016). Evaluation of sampling in geometallurgical programs through synthetic deposit model. *IMPC 2016 - 28th International Mineral Processing Congress*, 1–11. https://www.academia.edu/37969517/EVALUATION_OF_SAMPLING_IN_GEOMETALLURGICAL_PROGRAMS_THROUGH_SYNTHETIC_DEPOSIT_MODEL
- Lishchuk, V., & Pettersson, M. (2021). The mechanisms of decision-making when applying geometallurgical approach to the mining industry. *Mineral Economics*, 34(1), 71–80. <https://doi.org/10.1007/S13563-020-00220-9/FIGURES/3>
- MINEM. (2022). *Minería peruana: moderna, responsable y sostenible. Boletín Estadístico Minero* (Dirección de Promoción Minera, Ed.; 07–2022nd ed.). Ministerio de Energía y Minas. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3592043/BEM07-2022.pdf?v=1662412516>
- Mohammadi, S., Rezai, B., Abdollahzadeh, A., & Mortazavi, S. M. (2021). Evaluation of the geometallurgical indices for comminution properties at Sarcheshmeh porphyry copper mine, Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 13(1), 41–49. <https://doi.org/10.30495/IJES.2021.678955>
- Montiel, L., & Dimitrakopoulos, R. (2015). Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach. *European Journal of Operational Research*, 247(1), 166–178. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.05.002>
- Mwanga, A., Rosenkranz, J., & Lamberg, P. (2015). Testing of Ore Comminution Behavior in the Geometallurgical Context—A Review. *Minerals 2015, Vol. 5, Pages 276-297, 5(2), 276–297*. <https://doi.org/10.3390/MIN5020276>
- Navarra, A., Grammatikopoulos, T., & Waters, K. (2018). Incorporation of geometallurgical modelling into long-term production planning. *Minerals Engineering*, 120, 118–126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.010>
- Ranjbar, A., Mousavi, A., & Asghari, O. (2021). Using Rock Geomechanical Characteristics to Estimate Bond Work Index for Mining Production Blocks. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, 2569–2583. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42461-021-00498-5>
- Rivera Carrasco, F. (2012). *Geología y geocronología del pórfido de Cu-Au Zafranal, en el sur del Perú*. Sociedad Geológica del Perú. https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=43544&query_desc=an%3A%2211011%22
- Shayestehfar, M. R., Nasab, S. K., & Mohammadalizadeh, H. (2008). Mineralogy, petrology, and chemistry studies to evaluate oxide copper ores for heap leaching in Sarcheshmeh copper mine, Kerman, Iran. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 602–612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.100>
- Soltani, F., Afzal, P., & Asghari, O. (2014). Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration–volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran. *Elsevier Journal of Geochemical Exploration*, 140, 64–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.007>
- Tumialán De la Cruz, P. H. (2003). Compendio de Yacimientos Minerales del Perú. *INGEMMET, B*, 1–619. <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/2007/cyacimientos/ficha.htm>
- Uzategui, Á., Azán, J., & Ríos, H. (2016). Mineralización y Fases Intrusivas en el Pórfido de Cobre-Oro-Molibdeno de Cerro Corona. *XVIII Congreso Peruano de Geología*, 1–3.
- Uzategui Obando, A. A. (2016). *Mineralización y fases intrusivas en el pórfido de cobre-oro-molibdeno de Cerro Corona*. XVIII Congreso Peruano de Geología; Sociedad Geológica del Perú. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=46632>
- Vann, J., & Guibal, D. (2000). Beyond Ordinary Kriging – An Overview of Non-linear Estimation. *Symposium on Beyond Ordinary Kriging*, 6–25. https://www.academia.edu/6634827/Beyond_Ordinary_Kriging_An_Overview_of_Non_linear_Estimation

Contribución de autoría

Conceptualización: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Curación de datos: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Análisis formal: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Adquisición de fondos: No aplica

Investigación: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Metodología: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Administración del proyecto: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Recursos: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Software: Nelson Jesús Ramos Armijos

Supervisión: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Validación: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Visualización: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Redacción - borrador original: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis

Redacción - revisión y edición: Nelson Jesús Ramos Armijos – Julia Marilú Calderón Celis