

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**T E S I S**

**Modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en**

**Sociedad Minera El Brocal 2024 – Tinyahuarco – Pasco**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Geólogo**

**Autor:**

**Bach. Juan Carlos DE LA CRUZ CAHUANA**

**Asesor:**

**Dr. Favio Maximo MENA OSORIO**

**Cerro de Pasco – Perú – 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**T E S I S**

**Modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en**

**Sociedad Minera El Brocal 2024 – Tinyahuarco – Pasco**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Jose Fermin HINOJOSA DE LA SOTA**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Eder Guido ROBLES MORALES**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Teofilo Ivan POMA INCHE**  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 001-2026-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**“Modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As  
en Sociedad Minera El Brocal 2024 – Tinyahuarco – Pasco”**

Apellidos y nombres del tesista

**Bach. Juan Carlos De la Cruz Cahuana**

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Favio Maximo Mena Osorio

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Geológica**

Índice de Similitud

**2 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 21 de enero del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO  
ISIDRO Ruben Edgar FAU  
20154605048 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 21.01.2026 11:44:16 -05:00

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por todo el apoyo incondicional durante mi formación profesional, por sus sabios consejos, por los valores inculcados y sobre todo por ser el soporte en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Dios por brindarme vida y salud.

A mis padres por el apoyo incondicional en las diferentes etapas de formación académica y por ser el impulso para lograr mis proyectos de vida.

A mi casa superior de estudios Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, especialmente a mis docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Geológica, quienes aportaron en mi formación profesional.

A los trabajadores de la Sociedad Minera El Brocal, en especial a quienes laboran en el área de geología; por contribuir con la recolección de datos e información para mi investigación.

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la Sociedad Minera El Brocal, ubicada en Tinyahuarco, Pasco, Perú, con el objetivo de identificar zonas con presencia de minerales arsenicales económicamente aprovechables mediante el uso del ratio Cu/As. El estudio se enmarca en el contexto operativo de la unidad minera, donde en 2022 ocurrió un accidente fatal que, sumado a aspectos ambientales, conllevó a la paralización temporal de las operaciones del tajo.

Para ello, se aplicó una investigación de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental transversal, utilizando datos geológicos, geoquímicos y de sondajes. Esto permitió realizar el análisis exploratorio, el estudio variográfico y la construcción de un modelo tridimensional de bloques en función del ratio Cu/As.

Los resultados evidenciaron que el uso del ratio Cu/As mejoró la precisión de la estimación, permitiendo diferenciar zonas arsenicales, mixtas y no arsenicales, y estimar aproximadamente 1.5 millones de toneladas de recursos medidos con mayor confiabilidad. En conjunto, el modelo geoestadístico contribuye a una mejor planificación minera y a la reducción de la incertidumbre en la toma de decisiones.

**Palabras clave:** ratio, modelamiento de recursos, geoestadística, minerales arsenicales.

## **ABSTRACT**

This research was conducted at Sociedad Minera El Brocal, located in Tinyahuarco, Pasco, Peru, with the objective of identifying zones containing arsenic-bearing minerals with economic potential using the Cu/As ratio. The study is framed within the operational context of the mining unit, where in 2022 a fatal accident occurred which, together with environmental factors, led to the temporary suspension of open-pit operations.

To achieve this, an applied research approach with a quantitative focus and a non-experimental cross-sectional design was implemented, using geological, geochemical, and drilling data. This allowed for exploratory data analysis, variographic study, and the construction of a three-dimensional block model based on the Cu/As ratio.

The results showed that the use of the Cu/As ratio improved the accuracy of the estimation, allowing the clear differentiation of arsenical, mixed, and non-arsenical zones, and enabling the estimation of approximately 1.5 million tonnes of measured resources with higher confidence. Overall, the applied geostatistical model proved to be a useful and reliable tool for improving mine planning and reducing uncertainty in operational and economic decision-making.

**Keywords:** ratio, resource modeling, geostatistics, arsenical minerals.

## INTRODUCCIÓN

La industria del cobre sigue siendo un pilar clave para la economía mundial, y países como Perú ocupan posiciones estratégicas tanto en producción como en reservas. Para asegurar que estos recursos se aprovechen de manera eficiente y rentable, es fundamental contar con procesos precisos de modelamiento y estimación de recursos minerales, ya que de ellos depende la correcta planificación, inversión y sostenibilidad de los proyectos mineros.

Uno de los principales desafíos técnicos actuales es la presencia de arsénico en los yacimientos de cobre. Este elemento representa un problema tanto para el procesamiento metalúrgico como para el cumplimiento de estándares ambientales. En este contexto, el ratio Cu/As surge como una variable clave para clasificar los recursos, establecer leyes de corte y tomar decisiones más acertadas durante la etapa de planificación minera.

En Perú, la Sociedad Minera El Brocal, ubicada en el distrito de Tinyahuarco, Pasco, enfrenta esta problemática en su proyecto Marcapunta Oeste, donde se han identificado zonas con contenido variable de cobre y arsénico. A pesar de contar con campañas de exploración extensas y datos geológicos valiosos, la presencia de impurezas y la complejidad del yacimiento exigen aplicar técnicas geoestadísticas más detalladas, que reduzcan la incertidumbre y mejoren la toma de decisiones.

Además, la estimación incorrecta de los recursos puede tener consecuencias graves: desde sobrestimaciones que generen inversiones innecesarias, hasta subestimaciones que acorten la vida útil del proyecto. En ambos casos, se ven afectados los márgenes económicos, el empleo local y el impacto ambiental del proyecto.

Frente a este panorama, la presente investigación busca responder a la siguiente pregunta:

¿Cómo influye el modelamiento y la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en la caracterización y planificación minera de la Sociedad Minera El Brocal durante el

año 2024?

Para ello, se aplicaron herramientas de modelamiento 3D y geoestadística, con el objetivo de optimizar la gestión de los recursos, mejorar la clasificación del material y proponer una metodología replicable en otros proyectos con características geológicas similares.

Este proyecto de investigación se estructura en cuatro capítulos. El Primer Capítulo desarrolla el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y las limitaciones del estudio. El Segundo Capítulo presenta el marco teórico, los antecedentes, los conceptos clave y las variables de investigación. El Tercer Capítulo describe la metodología empleada y los procedimientos aplicados. Finalmente, el Cuarto Capítulo expone los resultados obtenidos, su análisis, la interpretación y la discusión correspondiente.

# ÍNDICE

Página.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

## CAPITULO I

### PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	3
1.2.1.	Delimitación espacial.....	3
1.2.2.	Delimitación temporal .....	3
1.2.3.	Delimitación conceptual .....	3
1.3.	Formulación del problema .....	3
1.3.1.	Problema general .....	3
1.3.2.	Problemas específicos.....	3
1.4.	Formulación de objetivos.....	4
1.4.1.	Objetivo general.....	4
1.4.2.	Objetivos específicos .....	4
1.5.	Justificación de la investigación .....	5
1.5.1.	Justificación teórica .....	5

1.5.2.	Justificación práctica.....	5
1.5.3.	Justificación metodológica.....	6
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	6

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	8
2.1.1.	Antecedente internacional.....	8
2.1.2.	Antecedente nacional.....	14
2.1.3	Antecedente local.....	19
2.2.	Bases teóricas - científicas.....	21
2.2.1.	Recurso mineral.....	21
2.2.2.	Modelamiento.....	24
2.2.3.	Variables geológicas.....	28
2.2.4.	Metodología de interpolación.....	54
2.2.5.	Procedimiento para generar un modelo de bloques.....	57
2.3.	Definición de términos básicos.....	81
2.4.	Formulación de hipótesis.....	83
2.4.1.	Hipótesis general.....	83
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	83
2.5.	Identificación de variables.....	84
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores.....	84

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de la investigación.....	90
3.2.	Nivel de investigación.....	91

3.3.	Métodos de investigación.....	92
3.3.1.	Método general .....	92
3.3.2.	Métodos específicos.....	92
3.4.	Diseño de investigación .....	93
3.5.	Población y muestra .....	95
3.5.1.	Población.....	95
3.5.2.	Muestra .....	95
3.5.3.	Muestreo .....	95
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	95
3.6.1.	Técnicas .....	95
3.6.2.	Instrumentos.....	96
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación ..	97
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	98
3.9.	Tratamiento estadístico .....	98
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica .....	99

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

4.1.	Descripción del trabajo de campo.....	100
4.1.1.	Comparación con Análisis Previos .....	100
4.1.2.	Análisis exploratorio de base de datos geológica .....	101
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	120
4.3.	Prueba de hipótesis.....	131
4.4.	Discusión de resultados.....	134
4.4.1.	Procesamiento de Datos y Validación .....	134
4.4.2.	Variografía y Geoestadística Aplicada .....	135

4.4.3. Modelamiento Tridimensional.....	135
4.4.4. Estimación y clasificación de recursos .....	135
4.4.5. Impacto del Ratio Cu/As.....	136
4.4.6. Distribución y Caracterización de los Recursos .....	136

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1 Operacionalización de variables .....	85
Tabla 2 Base de datos tipo Collar .....	102
Tabla 3 Base de datos tipo survey.....	103
Tabla 4 Base de datos tipo Assay .....	104
Tabla 5 Base de datos tipo Lito.....	104
Tabla 6 Datos assay con el ratio Cu/As .....	112
Tabla 7 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores.....	115
Tabla 8 Validación del modelo geostatístico .....	133
Tabla 9 Resultados de prueba de hipótesis .....	133

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Página.</b>
Figura 1 Clasificación de recursos minerales .....	22
Figura 2 Diagrama para diversos depósitos de minerales.....	30
Figura 3 Esquema de modelación del yacimiento .....	33
Figura 4 Criterio de Variación Gradual .....	34
Figura 5 Criterio del punto más Próximo .....	34
Figura 6 Wireframing .....	38
Figura 7 Método de los triángulos .....	38
Figura 8 Método de los polígonos .....	39
Figura 9 Sondeos en malla regular.....	40
Figura 10 Yacimiento dividido en polígonos.....	40
Figura 11 Modelo de bloques de una sección .....	43
Figura 12 Grado de estimación con o sin control de dominio .....	44
Figura 13 Variografía de una base de metal a 270 metros.....	46
Figura 14 Variografía de una base de metal a 270 metros.....	47
Figura 15 Método de la distancia ponderada .....	48
Figura 16 Relación del efecto pepita con la potencia .....	49
Figura 17 Observación de Krige entre los recursos estimados y los valores reales .....	50
Figura 18 Matriz del sistema de varianza Kriging.....	53
Figura 19 Sistema de matrices de varianza Kriging .....	53
Figura 20 Recolección de datos geológicos.....	57
Figura 21 División del yacimiento.....	58
Figura 22 Trazo de mallas regulares .....	58
Figura 23 Localización de los cubos.....	59

Figura 24 Representación del yacimiento en bloques.....	60
Figura 25 Subdivisión de bloques.....	60
Figura 26 Diagrama de bloques .....	61
Figura 27 Efecto del tamaño de bloque en la separación del mineral y residuos .....	67
Figura 28 Aleaciones de cobre.....	71
Figura 29 Proceso productivo común para minerales oxidados y sulfurados.....	73
Figura 30 Proceso productivo minerales oxidados .....	75
Figura 31 Proceso productivo minerales sulfurados .....	77
Figura 32 Formas alotrópicas del arsénico .....	78
Figura 33 Proceso de lixiviación de cobre con alto contenido de arsénico .....	81
Figura 34 Límites en coordenadas de la zona de modelamiento .....	106
Figura 35 Topografía y curvas de nivel de la zona de modelamiento .....	106
Figura 36 Vista del modelo topográfico en tres dimensiones.....	107
Figura 37 Vista en planta del modelo geológico de la zona de Marcapunta .....	109
Figura 38 Vista tridimensional del modelo geológico de la zona de Marcapunta.....	110
Figura 39 Vista tridimensional de los sondajes de perforación .....	111
Figura 40 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores .....	113
Figura 41 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores .....	113
Figura 42 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores .....	114
Figura 43 Dispersión Observado vs Estimado (Cu/As).....	116
Figura 44 QQ-Plot de residuales.....	116
Figura 45 Histograma de residuales.....	117
Figura 46 Swath plot en dirección X. ....	117
Figura 47 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores .....	118
Figura 48 Análisis exploratorio de datos y corrección de errores. ....	119

Figura 49 Vista de los sondajes con los limites geológicos.....	119
Figura 50 Datos assay con el ratio Cu/As.....	120
Figura 51 Histograma normalizado del ratio Cu/As.....	121
Figura 52 Histograma con datos sin procesar y normalizados del ratio Cu/As.....	121
Figura 53 Trazo de efecto .....	122
Figura 54 Datos sin procesar y normalizados del ratio Cu/As.....	122
Figura 55 Normalización del ratio Cu/As.....	123
Figura 56 Variograma vs Distancia .....	124
Figura 57 Modelamiento tridimensional.....	125
Figura 58 Mapa tipo de varianza de kriging (KV) por banco.....	126
Figura 59 Razon Cu/As en El Brocal.....	127
Figura 60 Modelamiento tridimensional para estimación .....	128
Figura 61 Modelamiento tridimensional para estimación .....	129
Figura 62 Modelamiento tridimensional comparativo.....	130
Figura 63 Recursos Cu Mixto.....	130

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La Sociedad Minera El Brocal, una de las minas más importantes y antiguas del Perú, enfrenta un reto creciente debido a la reducción de sus recursos minerales tradicionales. A lo largo de los años, los minerales con alta ley de cobre y bajos niveles de impurezas, que eran los más fáciles y rentables de extraer, se han ido agotando. Esto obliga a la empresa a considerar yacimientos más profundos o minerales con características menos favorables, con un mayor contenido de arsénico, para mantener la producción y la viabilidad económica del proyecto.

Actualmente, los minerales que contienen arsénico, especialmente aquellos de tipo calcosítico, se consideran como parte del recurso no económico debido a las complicaciones técnicas y ambientales que su procesamiento implica. Sin embargo, dada la escasez de recursos más limpios y rentables, resulta urgente desarrollar nuevas estrategias para evaluar y aprovechar estos minerales arsenicales, que hasta ahora han sido descartados en gran medida.

En este contexto, se ha planteado la necesidad de realizar un nuevo modelamiento y estimación de recursos basado en el ratio cobre/arsénico (Cu/As). Esta nueva metodología permitirá identificar con mayor precisión las zonas del yacimiento que contienen minerales arsenicales con una proporción favorable que podría ser explotada económicamente. Además, ayudará a optimizar la planificación minera y a tomar decisiones informadas sobre la capacidad de la planta de procesamiento para manejar este tipo de mineral, garantizando tanto la eficiencia operativa como el cumplimiento de las normas ambientales.

El problema central que se aborda en esta investigación es la falta de un modelamiento adecuado que considere la presencia y distribución del arsénico dentro de los recursos minerales. Esta carencia limita la capacidad de la empresa para planificar correctamente la explotación, lo que afecta directamente la rentabilidad, la sostenibilidad y la vida útil de la mina.

Dado que el arsénico dificulta los procesos metalúrgicos, aumenta los costos operativos y genera riesgos ambientales significativos, contar con un modelo que integre el análisis del ratio Cu/As se vuelve fundamental. Esto no solo permitirá recuperar recursos antes considerados no económicos, sino también asegurar una explotación más segura, rentable y sostenible a largo plazo.

Por esta razón, la presente investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo influye el modelamiento y la estimación de recursos minerales basados en el ratio Cu/As en la caracterización y planificación minera de la Sociedad Minera El Brocal durante el año 2024?

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **1.2.1. Delimitación espacial**

El presente estudio se desarrolló en la región de Pasco, provincia de Pasco, distrito de Tinyahuarco específicamente en la Unidad Minera de Colquijirca donde se ejecutaron los procesos de modelación y estimación de los recursos en base al ratio Cu/As.

### **1.2.2. Delimitación temporal**

El presente estudio se llevo a cabo durante los meses de Enero – Junio 2023 entre la toma de datos, procesamiento y análisis y entre Julio – Septiembre el 2024 el desarrollo del informe

### **1.2.3. Delimitación conceptual**

En este estudio, el ratio Cu/As se entiende como la relación entre las concentraciones de cobre y arsénico presentes en el mineral, parámetro que permite clasificar el material en zonas arsenicales, mixtas y no arsenicales. El modelamiento y estimación de recursos se abordaron desde una perspectiva geoestadística, aplicando conceptos como análisis exploratorio de datos, variografía y modelos de bloques tridimensionales.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo desarrollar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cómo realizar el análisis exploratorio y geológico de datos y geología para el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?

- b. ¿Qué metodología de modelización de dominios permite realizar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?
- c. ¿Cuáles son los parámetros del modelo de bloque para el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?
- d. ¿Cómo es la metodología de interpolación en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?
- e. ¿Cómo se clasifican los recursos minerales en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?
- f. ¿De qué manera se realiza la validación del modelado de recursos minerales en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?

#### **1.4. Formulación de objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Analizar datos geológicos para modelar y estimar recursos minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.
- b. Delimitar unidades geológicas mediante geoestadística para estimar recursos según el ratio Cu/As en El Brocal, 2024.

- c. Definir parámetros del modelo de bloques (soporte, coordenadas, variograma, continuidad y leyes interpoladas como Kriging y densidad de roca) para estimar recursos minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.
- d. Calcular la varianza de Kriging y el variograma para estimar recursos minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.
- e. Clasificar los recursos minerales según el modelo estimado del ratio Cu/As, conforme al informe JORC en Sociedad Minera El Brocal, 2024.
- f. Validar el modelo y la estimación de recursos según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.

## **1.5. Justificación de la investigación**

### **1.5.1. Justificación teórica**

Se justifica teóricamente, porque para modelar el comportamiento de los minerales de un yacimiento, en especial de cobre y arsénico, se determinan parámetros que se validan en la geología (litología), estadística (histogramas) y matemática pura (interpolaciones Kriging); de igual manera, para estimar los parámetros del cobre y arsénico en específico, se plantea categorizar las leyes y tonelajes para clasificarlos en relación a su nivel de confianza. Con lo expuesto, se plantea obtener resultados verídicos del ratio de Cu/As para proyectar la vida útil de la mina, pues al extraer la mayor cantidad de arsénico, se incrementa la pureza del cobre, y estos resultados son comparados en diagramas de dispersión de parámetros estimados con resultados reales.

### **1.5.2. Justificación práctica**

El modelamiento correcto y estimación de recursos minerales precisa garantizar la rentabilidad de un proyecto. Por lo expuesto, la investigación se justifica de manera práctica porque el modelamiento y estimación de recursos minerales basados en el ratio

Cu/As tiene una relevancia práctica significativa para la Sociedad Minera El Brocal, debido al hecho que, al analizar, cuantificar e interpretar resultados se logra predecir los recursos contenidos en un yacimiento mineral para poder clasificarlos. También, reduce los costos de exploración pues con datos específicos se puede sistematizar los recursos de todo el yacimiento. En relación al cobre, si se logra estimar con certeza la cantidad de minerales que lo contaminan como el arsénico, se pueden adoptar prácticas metalúrgicas diferentes y más eficientes, de esta manera, establecer un proceso de metalurgia con reducción de desperdicios y reutilización de sustancias.

### **1.5.3. Justificación metodológica**

Se justifica metodológicamente porque al encontrar la relación de cobre y arsénico requiere de realizar procesos previos como el modelado de bloques para su realización pues se logra interpolar la distribución de los datos para calcular la ley. También, mediante interpolaciones matemáticas complicadas se generan gráficos estadísticos, como variogramas que detallan la continuidad existente de los metales. Todo este procedimiento, se realiza de forma más sintetizada empleando el software Leapfrog. Luego estableciendo ciertos valores para la ley de corte, para determinar cuál de los dos minerales es el más rentable para procesar y generar utilidades en la empresa. Esta aproximación metodológica no solo facilita una estimación consolidada y confiable de los recursos minerales, sino que también promueve el desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas en el campo de la minería, con el fin de maximizar la extracción que generará rentabilidad integral en la producción del metal rojo (cobre).

### **1.6. Limitaciones de la investigación**

La variabilidad natural del arsénico en el yacimiento, lo que puede generar cambios locales que no siempre se reflejan de manera uniforme en el modelo de bloques.

La poca información disponible sobre investigaciones similares basadas en el ratio Cu/As, lo que hizo más difícil comparar los resultados y resalta la necesidad de desarrollar más estudios en esta temática.

Acceso restringido a la licencia del software requerido para el modelamiento geoestadístico.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedente internacional**

Álvarez y Lovera (2022) estructuraron un artículo titulado: “Modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales”, elaborado para la “Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 25(50); pp. 3-13” en Lima, Perú.

El artículo tuvo como objetivo integrar información geoquímica y metalúrgica para desarrollar un modelo geometalúrgico en una zona de minería potencial en Ecuador. La metodología fue deductiva de análisis integral, de tipo aplicada, con diseño no experimental-transversal correlacional. De esta manera, se tomaron 448 muestras de sedimentos fluviales de los cuales se exteriorizan 37 elementos, entonces, al aplicar las transformaciones log-cociente mediante el software CodaPack, se logró clasificar los elementos en 04 agrupaciones: sonda de pórfidos de Cu-Au, sonda de vetas de Au-Ag, elementos perjudiciales para el proceso de flotación y elementos perniciosos para el proceso de lixiviación. También, se aplicó evaluación geoestadística y método de

Kriging ordinario, obteniendo planos con las anomalías existentes asociadas a los elementos geoquímicos. Los resultados mostraron un sistema de fallas predominantes y menores perpendiculares que se relacionan a zonas mineralizadas. Para el análisis de datos metalúrgicos, la recuperación de oro, en el proceso de flotación el índice fue bajo en concentrado de elementos penalizantes; en el proceso de lixiviación, el porcentaje de recuperación fue del 90.5% pero el alto índice de elementos penalizantes fue alto. También, se plantearon diferentes modelos basados en la variografía, para las 4 agrupaciones de elementos, para la sonda de pórfidos Cu-Au el modelo planteado fue exponencial, para la sonda de veta de Au-Ag el modelo fue esférico, de igual manera se utilizó el modelo mencionado para el caso del proceso de flotación y lixiviación. Agrupando los parámetros mencionados y la aplicación del análisis Kriging, los investigadores encontraron un alto potencial de presencia de Cu-Au, en la cuenta del río San Gerónimo. El artículo concluyó que, la aplicación de un análisis comparativo, entre los procesos de flotación y lixiviación, junto con la estimación de Kriging dentro del modelo geometalúrgico exponencial, permitió previsualizar y focalizar zonas de exploración en el río Cuenca San Gerónimo, Ecuador.

Arango y Rentería (2022) plantearon en su investigación titulada: “Cálculo de reservas y estimación de recursos de oro en la mina providencia de Gran Colombia Gold”, para optar por el título de “Especialista en Sistemas de Información Geográfica”, este informe fue realizado para la especialización en “Sistemas de Información Geográfica, Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Manizales”, Colombia.

El informe de tesis tuvo como objetivo calcular y estimar los recursos y reservas de oro existentes en la mina Providencia de Gran Colombia Gold-Segovia, aplicando un análisis geoestadístico y el sistema de información geográfica (SIG). La metodología

fue deductiva, de tipología aplicada, nivel descriptivo, diseño no experimental transversal. La muestra fue de 17700 canaletas y 72 pozos de perforación diamantina, se utilizaron métodos geoestadísticos, programas (Leapfrog y ArcGIS Pro) e interpolaciones (Kriging Ordinario, Inverso de la distancia al cuadrado e Inverso de la distancia al cubo). Los resultados en el modelo geológico, se fueron 2 sólidos: Bloque 120 (mayor tamaño) y bloque 130 (menor tamaño) luego de aplicar un algoritmo de modelamiento implícito. En cuanto a la caracterización al yacimiento, el depósito fue vertiforme, de espesor variable y con una falla de por medio. Para el análisis exploratorio, se observó un pozo aislado donde existen de 12 a 20 g/TN Au. El coeficiente de variación del histograma fue mayor al 30%, entonces, los datos fueron heterogéneos. Luego de haber realizado tres corridas con las interpolaciones mencionadas, se cuantificó el bloque generado en reporte de recursos, en el cual se divide en categorías: recursos medidos (329,151 toneladas), recursos indicados (34,747 toneladas) y recursos inferidos (4,718 toneladas); para las reservas se reportó (242, 480 toneladas). En conclusión, se logró calcular y estimar con certeza los recursos de la mina Providencia, aplicando el modelamiento de bloques con interpolaciones, los cuales fueron 268,875 onzas troy de Au en total dividido en recursos medidos, indicados e inferidos, también con la aplicación del SIG se estimó en rango de reserva, un aproximado de 153,001 onzas troy de Au.

Donoso (2020) redactó en su investigación que lleva por título: “Modelamiento geometalúrgico de recuperación de cobre incorporando datos espectrales”, con el fin de optar por el grado de “Magister en Minería, del departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile”, en Santiago de Chile.

El presente informe presentó por objetivo utilizar el porcentaje de recuperación de cobre (%RecCu) provenientes de datos espectrómetros y ensayos de flotación para implementar un modelo de estimación 3D. La metodología fue comparativa, de tipología fue aplicada, de nivel correlacional y diseño no experimental transversal correlacional, donde se evaluó dos modelos de recuperación de cobre. Para la muestra, se emplearon datos de dos grupos de ensayos de flotación rougher, el primero proveniente de la mena principal de calcopirita (1135 gramos c/u), el segundo perteneciente a las sobras de cada cambio de procedimiento (750 gramos c/u), la selección que se llevó a cabo fue por muestreo estratificado obteniendo un promedio de recuperación de cobre del 91.3%. Por otro lado, los datos de espectrometría fueron los 650 registros con 17318 valores de la zona de estudio captados por el programa LabSpec. Las técnicas de predicción que fueron incorporadas en un modelo tridimensional, se dieron a partir de la interpolación por Cokriging y la estimación interpretada con métodos de regresión: Usando componentes (PCR) y usando mínimos cuadrados parciales (PLSR). Consecuentemente, los resultados mostraron que los métodos se diferencian por una disminución en la desviación estándar, es así que, las medidas para predecir el porcentaje de recuperación de cobre mediante el método directo (Cokringing) e indirecto (PLSR) tienen diferencias poco significativas inferiores a 1.4%. Se concluye que, al integrar datos de espectrofotómetros con los datos de flotación, se reduce la aparición de incertidumbre en espacios donde la información es limitada, por lo expuesto, la estructuración e implementación de un modelo 3D de predicción es más viable, solo si se revisa minuciosamente la información espectral y de flotación mediante la calibración de datos de los resultados.

Díaz y Cuador (2019) desarrollaron un artículo titulado: “Complejidades de la estimación de recursos en yacimientos tipo Bechi en el noroeste de Pinar del Río, Cuba,

usando Geoestadística no Lineal”, elaborado para la “Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 45; pp. 26-33” en Medellín, Colombia.

El objetivo de este artículo consistió en aplicar el Krigado Lognormal en la estimación de los recursos minerales de cobre (Cu) en el yacimiento “Hierro Mantua”. La metodología fue analítica, el tipo de investigación fue aplicada, nivel descriptivo con diseño no experimental transversal, en la investigación se realizó el análisis estructural de las muestras, para luego, transformar los datos de forma logarítmica y lograr estructurar un modelo. La población que se utilizó proviene de la base de datos del yacimiento, las muestras obtenidas fueron validadas con una longitud promedio de 1.22 metros. Se utilizó como instrumento de procesamiento de datos, la estadística descriptiva e inferencial. Los resultados obtenidos presentan una inexistencia de normalidad en los datos, razón por la cual, no es posible aplicar la estadística lineal, por lo tanto, se aplican las transformadas logarítmicas de los datos del cobre ( $\ln Cu$ ), por lo cual, los datos si presentan una distribución normal, la cual es respaldada al aplicar la estadística inferencial, en la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov, se calcula un valor de 0.026, el cual es menor que 0.05. Entonces se construyen, diferentes semivariogramas con los datos transformados logarítmicamente, pero a diferente pendiente, en especial la de  $45^\circ$ , donde se obtiene un coeficiente de Pearson del 0.92, connotando que el 87.11% de los datos se encuentran incluidos en el intervalo de predicción del Krigado logarítmico. Como conclusión, se presenta un ejemplo de los datos del yacimiento de cobre de “Hierro Mantua”, los cuales tienen una distribución asimétrica, por lo cual se aplica un diferente procedimiento de estimación de recursos minerales, el cual es Krigado Lognormal, donde se transforma los datos, con el fin de lograr una normalidad en la distribución, de esta manera, existe una proximidad en los valores de la media y varianza de la nueva transformación de datos.

Mostafaei y Ramazi (2019) redactaron el artículo “Estimación de recursos minerales utilizando una combinación de datos de perforación e IP-R aplicando métodos estadísticos y de Cokriging” para el “Boletín de investigación y exploración de minerales (160); pp. 177-195” en Iran.

La investigación presentó por objetivo combinar los datos de resistividad eléctrica (Rs) y polarización inducida y resistividad (IP) para estimar los recursos minerales de la mina de cobre Abassabad, con esto, estandarizar la ubicación de pozos y reducir la cantidad de perforaciones. La metodología fue deductiva, tipología práctica, de nivel correlacional, su diseño fue no experimental transversal correlacional, donde se utiliza la geoestadística y geofísica para plantear ciertos perfiles y modelos, respectivamente. Las técnicas empleadas son las regresiones, los análisis de regresión multivariada (MRA) y Cokriging. Los resultados geofísicos se obtuvieron gracias al programa Res2Dinv, para luego estructurar un modelo en 3D en base a los métodos geoestadísticos y respuesta de las perforaciones, también, se crearon 04 perfiles geofísicos donde se logró leer la resistividad ( $250 \Omega m$ ) y polarización (25 mV/V) en los 2000 puntos, es así que, el nivel de error del MRA fue 5.5% y 12.5% para secciones de polarización y resistividad, respectivamente. Entonces, al aplicar la regresión de la polarización inducida con el grado de Cu el resultado es apropiado, puesto que, presenta el menor error. Por otro lado, al estructurar el modelo 3D, se propone 7 perforaciones a una distancia de 30 metros, se estimó aproximadamente 1.95 millones de toneladas de cobre. En conclusión, la regresión de datos de las resistividades (Rs) no es adecuado para la estimación de Cu, puesto que, los intervalos fluctúan, esto provoca un error de estimación creciente. Por lo expuesto, se consideran los datos de la polarización inducida (IP) para estimar el contenido de Cu en el yacimiento, también, gracias a los parámetros geoestadísticos planeados, se logró

optimizar la ubicación de los pozos y se reduce el número de pozos de perforación a 30% del número inicial.

### **2.1.2. Antecedente nacional**

Rivera (2023) redactó el informe “Estimación de los recursos minerales para calcular la ley equivalente y Cut Off del proyecto Hilarión – Compañía Minera Milpo S.A.A. – Ancash”, a modo de optar por el título profesional de “Ingeniero de minas, en la Escuela de formación profesional de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería de minas para la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión” en Cerro de Pasco, Perú.

La investigación tuvo por objetivo, calcular la Ley Equivalente y Cut Off del Proyecto Hilarión de la Compañía Minera Milpo S.A.A mediante la estimación de los Recursos Minerales. La metodología de la investigación fue deductiva al analizar los datos e inductiva al momento calcular la ley equivalente y Cut off del proyecto mencionado, la tipología fue aplicada, nivel descriptivo y correlacional con un diseño no experimental longitudinal. La población corresponde a los recursos minerales del proyecto Hilarión; la muestra se representó por los diversos sondajes diamantinos. Las técnicas de recolección y búsqueda bibliográfica fueron las empleadas en la investigación, junto con los instrumentos topográficos necesarios. Los resultados connotan que la reserva que puede ser minada en la compañía es de 48 millones de toneladas con ley de 3.02% para zinc, 0.66 onzas por tonelada de oro y 0.33% para cobre. El Cut off equivalente fue de 2.72 %Zn equivalente para el método de minado Sub Level Longitudinal y 3.41 %Zn equivalente para el método de minado Bench and Fill Stopping. En conclusión, la estimación de los recursos mediante el método de bloques, estructuró bloques primarios y secundarios listos para ser minados; sin embargo, en el cálculo del Cut off aún se puede maximizar el valor mediante

simulaciones, obteniendo una reserva lista para ser minada de 35 767 614 toneladas, con ley de zinc al 3.21%, para el plomo 1.01% y 0.74 onzas de Ag por tonelada.

Ramos y Calderón (2022) redactaron el artículo “Revisión del modelo geometalúrgico para la estimación de recursos minerales en depósitos pórfido cupríferos” para la “Revista de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 5(50); pp. 445-459” en Lima, Perú.

La investigación presentó el siguiente objetivo incorporar atributos geometalúrgico en la estimación de recursos minerales. La metodología fue aplicada, nivel descriptivo y explicativo, diseño no experimental, empleando la revisión documental como técnica de recolección de datos. Para los resultados se eligieron tres documentos: Modelamiento geometalúrgico de leyes de Cu y CuO en el depósito pórfido de Sungun - Geometalúrgia operativa en la Unidad Minera Cerro Corona - Modelamiento geometalúrgico en el depósito pórfido cuprífero de Zafranal. De los tres repositorios, se tiene una idea medular que consiste en categorizar y sistematizar la información cuantitativa sobre la mineralogía modal del depósito, ya que la producción cuprífera del periodo 2022 fue del 49.6% en el país. Los investigadores llegaron a la conclusión que, al integrar variables geometalúrgicas como: Ley de cobre total o cobre oxidado, especies asociadas al cobre y concentración de arsénico en el tajo, se logra crear modelos geometalúrgicos en base a pruebas de conminución, flotación y lixiviación, consecuentemente, la estimación de recursos minerales se incrementó en un 20%.

Lopez y Zamora (2021) estructuraron un artículo con el nombre de: “Aplicación del ratio de Knuckey y la anisotropía dinámica en la estimación de recursos minerales de Cerro Lindo”, para la “Revista Minería; pp. 270-274” en la provincia de Chíncha.

El artículo tuvo como objetivo estimar los recursos minerales de Cerro lindo, mediante la aplicación del ratio de Knuckey, para generar una tendencia estructural, de esta manera, buscar la dirección idónea de la anisotropía dinámica. La metodología fue deductiva, puesto que, utilizó una base de datos con la cual se generó un modelamiento geológico, para luego realizar un análisis exploratorio, con el fin de estimar, validar y reportar los recursos existentes, de esa manera, la tipología fue práctica de nivel descriptivo y diseño de investigación no experimental transversal. Las técnicas para modelamiento de bloques y estimación se realizaron mediante los programas: Leapfrog Geo y Studio RM, también para la interpolación se aplica la herramienta new Indicator RFB. Los resultados fueron aplicados en un yacimiento de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de modelo idealizado donde el valor del ratio de Knuckey es directamente proporcional al contenido de cobre dentro del yacimiento, consecuentemente, al aplicar la estimación por Kriging Ordinario, se obtienen rangos de sesgo mayor o menor al 5%. En conclusión, el uso del ratio de Knuckey para modelar y estimar recursos mineros contribuye positivamente, puesto que, al servir como base para aplicar la anisotropía dinámica, se logra obtener una estabilidad variográfica, por lo tanto, la estimación tiene un índice de mayor confiabilidad, el cual es 3% menor a los resultados de planta concentradora.

Sarmiento, et. al. (2021) desarrolló el artículo “Cerro Corona: Evolución de los modelos geológicos, vectorización geofísica y sus implicancias para el incremento de recursos minerales de Cu y Au más allá del 2030”, elaborado para la “Revista Minería; pp. 105-108” en la provincia de Cajamarca.

El artículo presentó como objetivo reinterpretar y vectorizar de manera no convencional los modelos geológicos 3D junto a los modernos estudios de IP profundo y Magneto Telúricos (MT), con el fin de, establecer targets de perforación. La

metodología fue sistemática, donde se detalla la geología local y distribución geoquímica, se vectoriza con IP profundo y establece los puntos de perforación, tipo de investigación fue aplicado de tipo descriptivo y diseño no experimental transversal, tomando como población al depósito de pórfido de cobre (Cu) rico en oro (Au) de Cerro Corona. Las técnicas utilizadas fueron la perforación intra mineral, categorización y vectorización por el método Orión Swath - método 3D inversión. Los resultados de la geología local dividen en tres eventos al tajo: Temprano, intermedio 1-2 y tardío; para la distribución geoquímica se tiene “Ore zones” donde existe Au (+ 0.3g/t) - Cu (+ 0.2%) y “Barren Zones” con contenido a nivel de traza en arsénico, antimonio, plata y molibdeno. Al vectorizar por el método Orión Swath, se obtuvo una resolución de 800 metros de profundidad, registrándose señales magneto telúricas de hasta 1500 metros. Por otro lado, al vectorizar por el método 3D inversión, las leyes de Cu se correlacionan moderadamente con la conductividad. Al establecer los puntos de perforación, se determinan 08 targets con ubicación diversa en todo el territorio del tajo, de donde se estima 107.22 TM a 0.58 g/t Au y 0.36 % Cu. El artículo concluye que, al incorporar nuevos recursos y métodos de exploración, se incrementa en un 3% el tonelaje de lo estimado y asciende hasta casi 1% en leyes de oro (Au) y cobre (Cu), también que la perforación en puntos específicos (targets) planteada en función a las vibraciones y cálculo de leyes del mineral, incrementó el hallazgo de minerales como el oro y cobre en Cerro Corona.

Guía (2021) estructuró el informe titulado “Evaluación geoestadística de los yacimientos de oro en minera urífera Retamas s.a. La Libertad – 2021”, con el fin de optar al grado académico de “Doctor en seguridad y control en minería en la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Minas, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Centro del Perú” en Huancayo, Perú.

El objetivo planteado en el informe consistió en ejecutar una evaluación geoestadística de los yacimientos de oro en la Minera Aurífera Retamas S.A. La metodología fue sistemática, tipo aplicada de nivel explicativo con diseño experimental, la población se encuentra en la Unidad Minera Retamas, dentro de un pórfido cuprífero de dimensiones 600 m x 800 m x 1000 m, las técnicas de recolección fueron la observación y recopilación, también con programas: GEMS y Excel. En los resultados, se obtuvieron 100 pozos de sondaje de exploración de los cuales se connotan 4817 datos. Al realizar los cálculos estadísticos, la media de ley de cobre total es 0,618; la varianza es 0,2. También, se analizó el efecto soporte de los puntos muestreados en los sondajes. En relación a la definición de la unidad de estimación, se consideraron diversos criterios como: litología similar, características de alteración, etc. Al realizar la prueba de hipótesis se obtiene el valor del nivel de significancia asintótica bilateral, 0,487, el cual es mayor al nivel de significación ( $\alpha=0,050$ ) entonces se acepta la hipótesis nula, es decir se acepta que: La distribución de la variable tonelaje ley Oro no difiere de la distribución normal, por lo que se debe utilizar una prueba paramétrica en la comprobación de la hipótesis. En conclusión, los valores para estimar la ley de oro en un proyecto minero oscilan de 0% a 26,2% y los valores obtenidos para el pórfido se encuentran dentro del rango. Se estiman recursos, donde la mayor cantidad pertenece a recursos inferidos y prosiguen los recursos medidos. El método de corte y relleno determinado para el pórfido cuprífero fue ascendente.

Gonzales (2020) redactó el informe titulado “Modelamiento geológico y estimación de recursos minerales de la veta rayo en la Unidad Minera Yauliyacu empresa minera Los Quenuales”, para optar por el título profesional de “Ingeniero Geólogo, Escuela profesional de Ingeniería Geológica, Facultad de Geología, Geofísica y Minas, de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa”.

El objetivo de la investigación fue plantear el modelo geológico 3D y estimar los recursos minerales de la veta Rayo de la Unidad Minera Yauliyacu. La metodología fue deductiva, tipo aplicada, nivel descriptivo, diseño no experimental transversal. La población se limita a la unidad minera Yauliyacu, el muestreo fue intencional con limitaciones de condiciones operativas, las técnicas para recolectar datos fueron trabajos de campo (mapeo geológico), trabajo de gabinete (planos geológicos), trabajo con softwares (Leapfrog) y método de estimación (kriging ordinario). Los resultados del modelamiento geológico, provienen de 6,166 muestras de canales y 561 de sondajes diamantino. Para la estimación de recursos, se obtuvieron tres tipos: recursos medidos con 103,854 toneladas (7.80 onzas de plata por tonelada, 0.92% ley de zinc, 0.49% ley de plomo y 0.03% ley de cobre); recursos indicados: 254,955 toneladas (7.79 onzas de plata por tonelada, 0.85% ley de zinc, 0.48% ley de plomo y 0.03% de cobre); recursos inferidos con 1,833,603 toneladas (5.93 onzas de plata por tonelada, 0.64% ley de zinc, 0.48% ley de plomo y 0.03% ley de cobre). En conclusión, el modelo geológico 3D se distribuye principalmente en la parte central y para sondajes diamantinos la longitud del espacio es de 50 metros. Para la estimación de recursos de la Unidad Minera Yauliyacu, se obtuvo 2,192,412 toneladas de las cuales el 0.68% fue ley de zinc, 0.48% fue ley de plomo, 0.03% fue ley de cobre, 6.23 onzas de oro por toneladas métricas y 3.24 fue de ley de hierro.

### **2.1.3. Antecedente local**

Churi (2023) elaboró el informe “Análisis geoestadístico de los cuerpos mineralizados de Pb-Zn para la validación del modelo de recursos de la pared oeste, Tajo Raúl Rojas – Cerro de Pasco, 2020”, para optar por el título profesional de “Ingeniero Geólogo, Escuela de formación profesional de Ingeniería Geológica,

Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión”, en Cerro de Pasco, Perú.

El objetivo de la presente investigación fue aplicar la geoestadística en el análisis de cuerpos mineralizados de Pb-Zn, con el fin de, mejorar la validación del modelo de recursos de la Pared Oeste del Tajo Raúl Rojas en Cerro de Pasco. La metodología fue cuantitativa, nivel aplicativo, diseño no experimental transversal, la población estaba representada por 1738 muestras geoquímicas y la muestra se determinó de manera no probabilística, con 56 sondajes pertenecientes a la Pared Oeste del tajo. La técnica para recolectar datos fue observación y recopilación documental a través de datos geoquímicos, mapas geológicos y softwares (LeapFrog, Excel). Los resultados de la investigación, luego de aplicar la geoestadística en la construcción del modelo de bloques, se obtuvo una estimación de 353 bloques para zinc con una ley media de 5.85% y 305 bloques para plomo con una ley media de 2.96%. La conclusión de la investigación, mostró que la geoestadística al ser ajustada en modelos de variogramas, da como resultado un modelo de bloque con dimensiones de 5x5x5 metros. En relación a la validación de datos, se obtuvo un decremento en la desviación estándar en un 17.4 % y la varianza en un 31.7 %, por lo tanto, el sesgo se mermó, por lo cual se optimiza el análisis y modelamiento de recursos minerales en la Pared Oeste del Tajo Raúl Rojas. Desde esta perspectiva del antecedente, se plantea utilizar como base los parámetros planteados en el modelo de bloques, junto con la simulación en Leapfrog para interpretar los resultados con estadística.

Herrera y Jorge (2019) estructuraron el informe titulado: “Estimación de reservas mineras utilizando software comercial y software libre en la Compañía Minera Volcan S.A.A. - Unidad Cerro de Pasco”, para optar por el título profesional de “Ingeniero de Minas, Escuela profesional de Ingeniería de Minas, Facultad de

Ingeniería de Minas Civil Ambiental, de la Universidad Nacional de Huancavelica” en Lircay.

La investigación estableció como objetivo verificar si existe una relación significativa de similitud al estimar reservas mineras, mediante el uso de software comercial y software libre en la compañía minera Volcan S. A. A. La metodología fue comparativa, del tipo aplicada, nivel descriptivo. La población fue representada por la empresa minera ya mencionada, la muestra fue escogida de manera no probabilística, escogiendo taladros diamantinos del cuerpo mineralizado K327. La técnica fue la observación directa mediante fichas de observación como instrumentos y programas (SGeMs). Los resultados, que se representaron con software comercial fueron de 47925,985 toneladas métricas; en cambio, con software libre fue 48607,940 toneladas métricas. Para la prueba de hipótesis empleando la distribución T student, el valor de la t calculada (0,25) es menor que la t tabla (2,306), entonces, se acepta la hipótesis nula, es decir: No existe una relación de similitud significativa en el proceso de estimación de reservas mineras, ya sea, con software comercial o software libre. En conclusión, la estimación de recursos al realizarse con dos tipos de software comercial o libre, generó una divergencia de 681,95 de toneladas métricas; sin embargo, no genera alguna diferencia significativa, puesto que el valor se encuentra dentro del rango de errores tolerables.

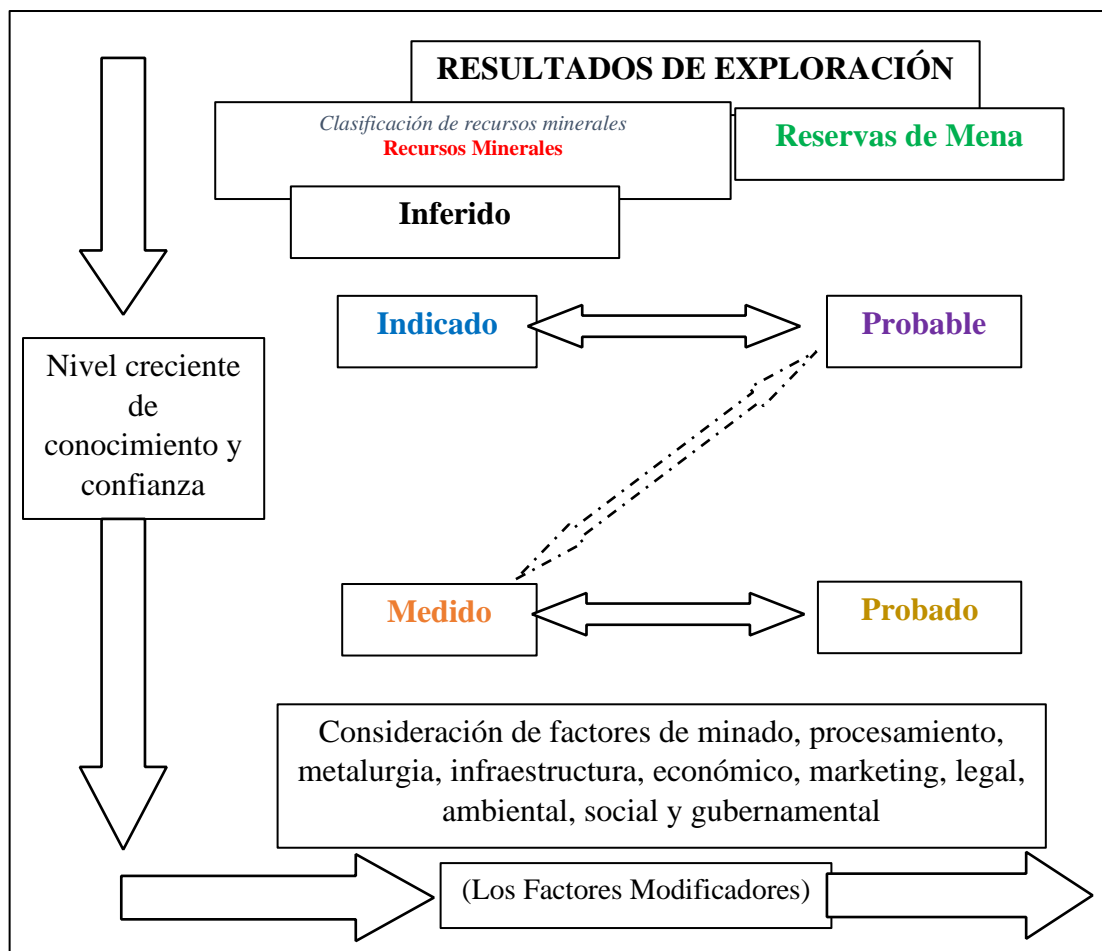
## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **2.2.1. Recurso mineral**

Joint Ore Reserves Committee (2012) define al recurso mineral como un material que proviene de la corteza terrestre, que posee concentraciones “anómalas” de interés geológico, esta concentración de material sólido tiene un interés económico de lo que se encuentra dentro o fuera de la corteza terrestre, mediante la calidad y cantidad

de mineral existente (p.16). Otro concepto, sostiene que es la concentración formada naturalmente que posee en su composición algún elemento o compuesto (Universidad Nacional San Juan, 2020). La clasificación de recursos ha tenido un dinamismo constante, pero hoy en día se cuenta con una serie de pautas y reglas, Código del Comité Conjunto de Australasia para Reservas de Mena (Código JORC por sus siglas en inglés), que estandarizan la clasificación y le otorgan una índole más profesional al proceso de estimación de recursos (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 10). En la figura 1 se aprecia la clasificación de los recursos.

**Figura 1** Clasificación de recursos minerales



*Nota.* Tomado de “Terminología para reportes”, presentado en The Australasian Institute of Mining and Metallurgy por Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 10.

- **Recurso Mineral Medido:** Trata sobre el recurso mineral que posee un nivel alto de confianza para aplicar factores modificadores de planeamiento minero, es decir la cantidad, ley, densidad, forma y características fisicoquímicas son óptimas y viables para el tratamiento (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 19). Su factor de continuidad o coeficiente de certeza que se aplica al tonelaje total de mineral probado es de 1.
- **Recurso Mineral Indicado:** Parte de un recurso mineral donde existe parámetros que permiten efectuar muestras y estudios limitados, pero sin embargo los datos extraídos del mismo no son suficiente para garantizar un continuidad geológica y ley (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 18). El valor de su coeficiente de certeza (factor de continuidad) del tonelaje con existencia probada es de 0.75.
- **Recurso Mineral Inferido:** Tipo de recurso mineral que presenta recursos muy limitados, en relación a muestreo y geología, los parámetros que posee (cantidad, densidad, ley, etc.) no permiten verificar una continuidad de calidad – ley (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 17) . Reserva de mena.

Joint Ore Reserves Committee (2012) define reserva como tonelaje de materia mineral que puede generar utilidad en un futuro, si se emplea tecnología. Su principal característica es que es cambiante, porque depende directamente de la morfología del yacimiento, mercado, legislaciones, economía, etc. Se divide en dos tipologías (p.17).

- **Reserva de Mena Probada:** Consiste la cantidad de recursos mineral medido que puede ser explotable y genere ganancias (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 34).
- **Reserva de Mena Probable:** Agrupa a la parte explotable de los recursos minerales indicados y en algunos casos los medidos, para generar economía (Joint Ore Reserves Committee, 2012, p. 34).

### **2.2.2. Modelamiento**

#### ***Modelo***

Mujica y Rincón (2011) definen que los modelos son la representación de la comprensión del funcionamiento de un sistema, objeto y/o idea, con el propósito de mermar problemas de la realidad. Los modelos juegan un papel importante en el desarrollo de las ciencias, ejemplo de ello, es el modelamiento específico utilizado para estimar recursos minerales de un proyecto minero. Dentro de la geología se pueden tipificar tres modelos básicos (p. 54).

- **Modelo geomecánico:** Agrupa a la geotecnia, la cual investiga la materia natural (rocas) aplicando principios geológicos, con la hidrología, donde se estudian las aguas terrestres, propiedades de las mismas, distribución en el espacio terrestre, etc.
- **Modelo geotécnico:** Emplea principios de la geología para estudiar el comportamiento del terreno al momento y después de realizar las obras de ingeniería en una determinada zona.
- **Modelo geológico:** Describe la composición de una zona geológica determinada (litología), leyes de minerales, estructuras, etc. (Tomás, Cuenca, Delgado, & Doménech, 2004)

#### ***Interpretación geológica***

Duke y Hanna (2014) establecen que, al momento de explorar un yacimiento mineral, se puede lograr una elucidación correcta de los datos de la superficie terrestre a través de la cartografía, muestreo de suelos, etc. Puesto que, se obtiene los resultados de las primeras perforaciones del área, es evidente que para corroborar mejor los datos se tiene que realizar más perforaciones, cabe recalcar que para una mejor interpretación se debe agregar características indirectas, como la geofísica intrínseca del área.

Entonces al unir, todos los datos extraídos, se logra realizar una validación cruzada. Dicho de otro de otro modo, al iniciar con el análisis se establecen datos específicos para los límites de dominios, los cuales categorizan el depósito por zonas de mineralización. Es así como, la incorporación de estos datos al modelo de estimación planteado es viable. Posteriormente, se realiza un análisis estadístico con variogramas respetando los dominios establecidos con límites, para proyectar una distribución espacial de grados, como resultados, se establecen los parámetros necesarios para estimar el grado del bloque.

### *Litología*

#### **1. Grupos litoestructurales:**

Nicholson y Hencher (1997) clasifican a las rocas, en relación a su resistencia y singularidades litológicas, es decir, sus grupos litoestructurales. La clasificación planteada deriva a las rocas en: Roca fuerte masiva, roca fuerte discontinua, roca compuesta, roca debilitada tectónicamente, roca débil granular, roca kárstica, roca anisotrópica y roca con apariencia de suelo (p. 914).

- Roca fuerte masiva: Los procesos de deterioro no los afecta pues resisten; sin embargo, la meteorización si presenta un peligro en su desintegración. Ejemplo de esta tipología son Granito, Dolerita, etc.
- Roca fuerte discontinua: Los sistemas de fracturas los afectan y deterioran. La Arenisca con uniones de sílica y conglomerados, etc. es un ejemplo de este tipo de roca.
- Roca compuesta: Debido a su rápido deterioro de la naturaleza causa colapsos de bloques, donde se presentan las intercalaciones de estratos duros y blandos, etc.

- Roca debilitada tectónicamente: Poseen zonas con altas fracturas que también pueden sufrir un colapso de manera súbita, como ejemplo, se tiene a una roca bandeada con fracturas.
- Roca débil granular: Debido a la meteorización, se forman láminas, colapsos y hasta caídas. Un ejemplo de este tipo roca es la arcillolita, calizas débiles, etc.
- Roca kárstica: Las Calizas, representan a este grupo el cual forma cavidades de disolución.
- Roca Anisotrópica: Forma cáscaras y láminas que provocan su propio colapso, tenemos como ejemplos de estas rocas lutitas, filitas, etc.
- Roca con apariencia de suelo: Los procesos de erosión deterioran este tipo de rocas con lavado superficial; el marl, chalk, etc. componen algunos ejemplares.

**2. Microestructura de las rocas: Suarez (1998) establece la microestructura de las rocas de la siguiente manera:**

- a) Minerales: Los minerales que constituyen las rocas varían según sean rocas metamórficas (clorita – epidotita – etc.) y cuando son rocas ígneas poseen cuarzo (mineral duro y de estructura química resistente - 21%) y feldespatos (silicoaluminatos de K, Na y Ca - 62%) (pp.164-165).
- b) Partículas constituyentes: El comportamiento de los materiales depende de las partículas de suelo y roca. Las partículas se subdividen por su tamaño en bloques (> 300 mm), cantos (150 a 300 mm), gravas (gruesas de 18 a 150 mm – finas de 4.76 a 18 mm), arenas (gruesas de 2 a 4.76mm - medias de 0.42 a 2mm - finas de 0.074 a 0.42mm), limos (granulares < 0.074 mm) y arcillas (plásticas < 0.074 mm) (pp. 165-166).

c) Textura: Hace referencia a la manera en que se distribuye los granos minerales dentro de la roca. Existen varios tipos de textura como: Cristalina, hipocristalina, hidralina y clástica (p. 166).

- Textura Cristalina: En el proceso de cristalización se compactan las rocas intactas.
- Textura Hipocristalina: Posee minerales amorfos de estructura de vidrio en rocas intactas.
- Textura Hidralina: Son rocas amorfas con textura de hidralina.
- Textura Clástica: La desintegración de otros materiales genera la formación de estos minerales.

d) Fábrica: Hace referencia a la distribución de los minerales dentro de la roca visto en tres dimensiones, incluyendo el contenido en volumen de los minerales y la porosidad asociada a cada uno. Puede ser: fábrica desordenada isotrópica, paralela y fibrosa (pp. 166-168).

- Fábrica desordenada: Distribución irregular común e las rocas ígneas, pero poseen una distribución estadística uniforme de los ejes presentados en forma de vidrio en la cartografía de minerales.
- Fábrica paralela: Compuestos de cristales que se solidificaron de manera paralela en rocas sedimentarias.
- Fábrica fibrosa: Variación del proceso de recristalización que forman una fábrica fibrosa.

### **3. Estructura de masa de rocas: Suarez (1998) presenta una estructuración de la masa de rocas.**

a) Estratificación: En el proceso de formación de la roca, existen contactos en la depositación de materiales a los cuales se le llama estratificación.

- b) Discontinuidades: Interrupción de la consistencia de roca intacta en toda la superficie. Se divide en: discontinuidades paralelas a la esquistosidad y discontinuidades paralelas a la estratificación.
- c) Pliegues: Las cargas tectónicas dan inicio al proceso de formación de pliegues, provenientes de la esquistocidad o estratificación.
- d) Fallas: Son el ente causante del deslizamiento y desplazamiento de rocas. Su clasificación se basa de acuerdo a como se desplaza la roca, ya sea, falla hacia abajo, hacia arriba, longitudinal y de rotación (pp. 168-174).
- e) Continuidad: Mide la magnitud de posibles fallas causadas principalmente por discontinuidades presentes en el terreno.
- f) Espaciamiento: Señala el límite hasta donde el bloque de roca es afectado por la discontinuidad y la roca intacta. Según la Oficina de Control geológico () se subdivide en: Espaciamiento extremo ancho (> 6m), muy ancho (2m - 6m), ancho (600 mm - 2m), medio (200 mm - 600 mm), cercano (60 mm - 200 mm), muy cercano (20 mm - 60 mm) y extremadamente cercano (< 20 mm).
- g) Resistencia al corte: Este parámetro se relaciona indirectamente con la discontinuidad pues, si la resistencia es alta, entonces, las discontinuidades son naturalmente cerradas; mientras que sí, la resistencia es baja, entonces, la discontinuidad será abierta.

### **2.2.3. Variables geológicas**

#### ***Tipo de depósito***

El espesor de la capa es delimitado, para comprender la morfología del lecho y dimensionar el bloque. Por ejemplo, los depósitos con forma piramidal, crean un problema en el diseño de bloques en forma de panal; en cambio, los depósitos de forma

tabular ampliada, generan bloques de mayor dimensión, por lo tanto, mayor dilución (Câmara, Leal, Peroni, & Capponi, 2018).

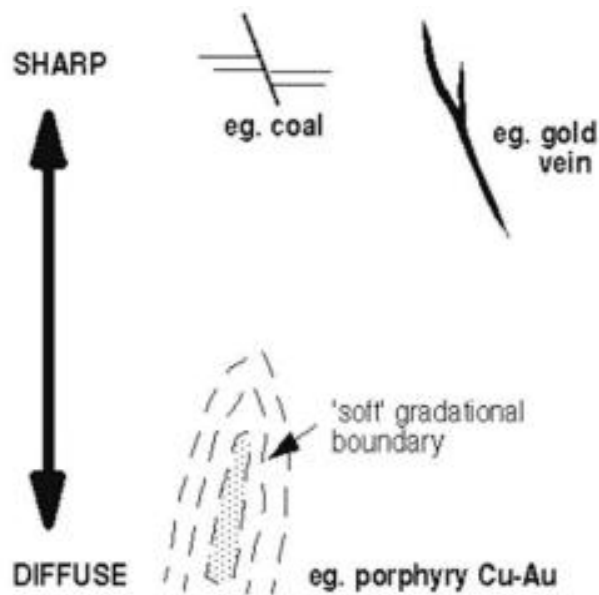
Duke y Hanna (2014) plantean que las variables geológicas más notorias de connotar son el tipo de depósito:

- Depósitos de costura, con alta continuidad en los bordes afilados, donde la definición de capa de techo y suelo es indispensable para comenzar a modelar (p. 146)
- Depósitos de vetas de metales preciosos, con continuidad moderada y límites agudos/difusos, se debe utilizar el atributo de densidad de perforación superficial normalmente disponible en el momento de la exploración (p.146).
- Pórfido Cu/Au/Mo depósitos, con buena continuidad vertical y límites difusos, posee bajo grado pues la zona mineralizada es de tipo gradual y puede fluctuar inesperadamente, por lo cual, se debe estimar la ley de estos depósitos (p. 146)

#### ***Requisitos de modelización para diferentes tipos de depósitos***

Luego de varios análisis, geoestadísticos se puede desarrollar un criterio correcto al momento de modelar, entonces al fusionar la geometría del dominio y la continuidad del grado, es posible crear un patrón de modelo para diferentes tipos de depósitos, con un volumen diverso de datos (Duke & Hanna, 2014, p. 146). En la Figura 2 se muestra el diagrama para diversos depósitos de minerales.

**Figura 2** Diagrama para diversos depósitos de minerales



*Nota.* Tomado de “Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation”, presentado en The AusIMM Guide to Good Practice por Duke y Hanna, 2014, p. 151.

### 1. Intersecciones

Castilla y Herrera (2012) plantean que en las campañas de perforación es de suma importancia identificar las intersecciones existentes en el cuerpo mineralizado. De ser posible, antes de esta fase se debe predecir las intersecciones con estructuras geológicas que se encontrarán en la trayectoria del sondeo (p. 36).

### 2. Modelamiento geológico o inventario mineral

Herrera (2017) La interpretación geológica precede al proceso de modelamiento, de esta forma, al ya obtener información directa e indirecta de los parámetros de evaluación mediante el análisis de los datos se puede entender al depósito minero, extrapolando información de los minerales distribuidos de forma diversa en la superficie terrestre. La metodología de modelamiento, precisa ciertos dominios, también llamados límites geológicos tales como, zona de enriquecimiento, zona de desmonte, zona de veta, etc. También, plantea, en base a

la aplicación de algoritmos con interpolaciones espaciales de atributos específicos, un modelado implícito que interpreta las leyes del mineral (extraídas en el proceso de muestreo), fallas, alteraciones, formaciones geológicas, etc. (p. 53).

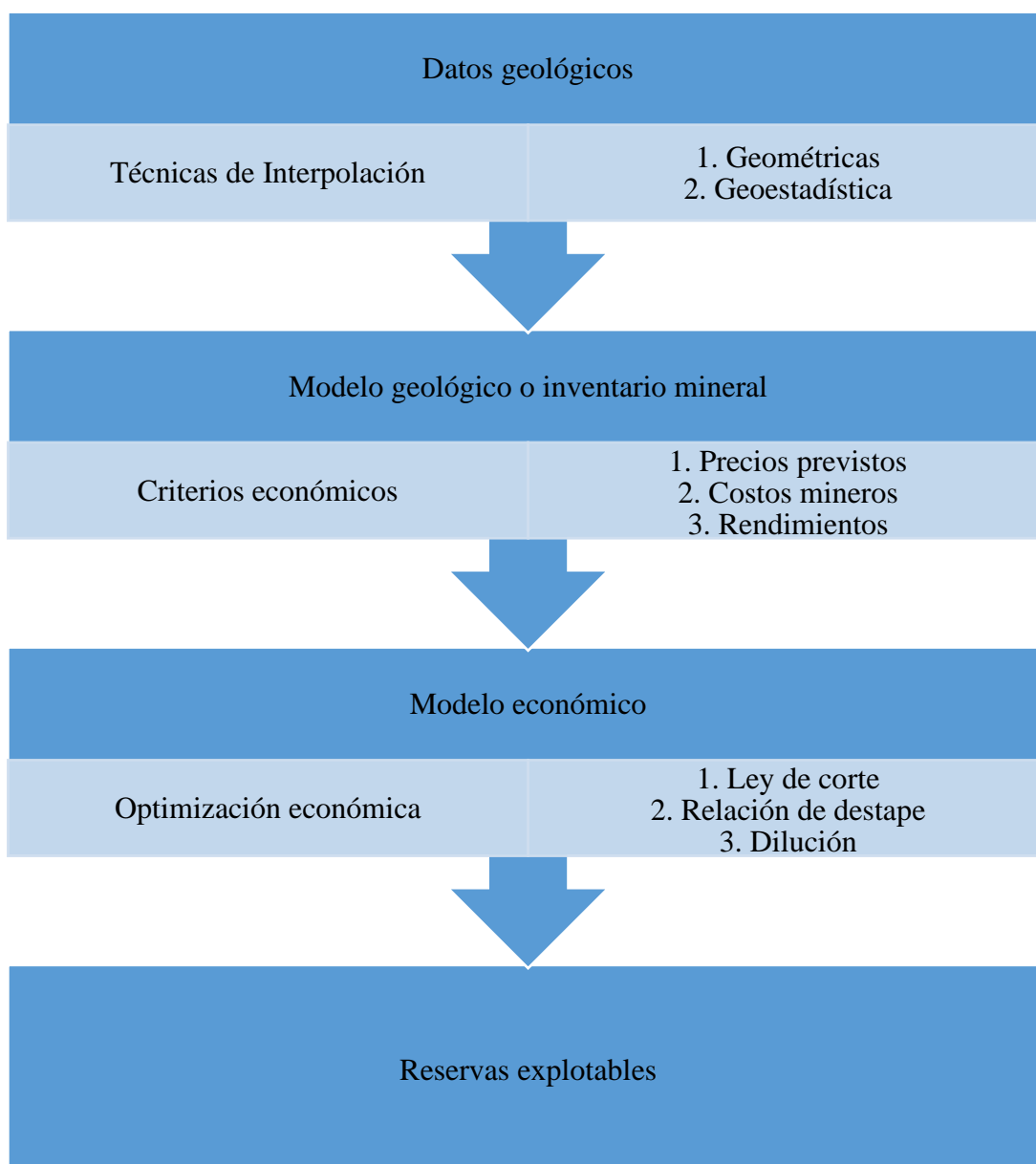
Consiste en detallar la realidad geológica del yacimiento, ya que, al aplicar técnicas de evaluación de muestras, se logra sintetizar todos los datos en un modelo específico, el cual se consigue empleando métodos de estimación diversos. Presenta un diseño complejo, el cual tiene una relación directamente proporcional con la extensión y valor cuantificado del proyecto, debido al hecho que para algunos proyectos donde el riesgo de pérdida es mínimo es correcto realizar modelados sin recurrencia de un software; en cambio, al delimitar el análisis de un proyecto de magnánimas dimensiones donde varios factores se unen es imperativo utilizar un software de modelado, con el fin de minimizar el rango de error. Cabe recalcar que, los modelos construidos para estimar los recursos minerales, deben estar en una actualización continua, esta característica medular, plantea que la cantidad de datos se incrementa junto con la información geológica extraída con los estudios continuos de la zona del yacimiento (Universidad Nacional San Juan, 2020, p. 06).

Tómas-Antonio et al. (2020) detalla que un modelo geológico es el estudio del comportamiento y las singularidades de un yacimiento, que es representado en modelos tridimensionales, en base a un análisis del espacio y tiempo de ciertas variables geológicas, con el propósito de encontrar una continuidad en su estructura morfológica, es así que, connotar una explicación de la formación y ubicación del yacimiento; entonces, al modelar todas estas características, se obtienen unidades geológicas (p. 301).

### **3. Modelación de yacimiento**

Proceso integral en el que es necesario caracterizar las singularidades del yacimiento, junto con los criterios apoyados en tecnología y economía para explotar este recurso mineral. En líneas generales, los modelos de un yacimiento son el respaldo indiscutible para ejecutar un proyecto, incluyendo los procesos de toma de decisiones y estrategia de negocios. Ya que, agrupan ciertas zonas dentro del yacimiento en función a características en común, para representar todo lo existente en el depósito (Universidad Nacional San Juan, 2020, pp. 3-4). En la Figura 3 se presenta el esquema total de la modelación de un yacimiento.

**Figura 3** Esquema de modelación del yacimiento



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 03.

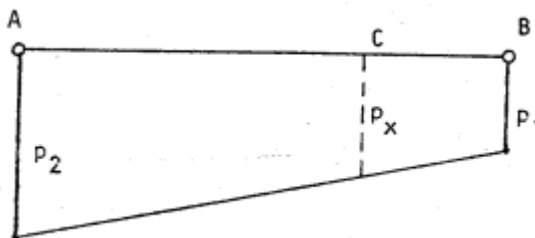
Los modelos de yacimientos presentan funciones matemáticas y técnicas que serán utilizadas en el proceso de estimación de recursos:

***Criterios de extensión de leyes***

Se evalúan mediante una función lineal en el Criterio de Variación Gradual, ya que los parámetros del yacimiento varían gradualmente y de forma continua entre dos

puntos que se encuentran adyacentes (Universidad Nacional San Juan, 2020, p. 06). Se muestra en la Figura 4 el criterio de variación gradual.

**Figura 4** *Criterio de Variación Gradual*



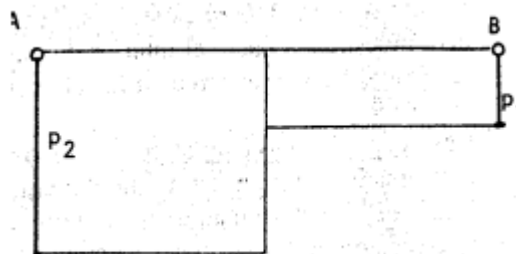
*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 06.

De esta manera, se puede calcular un valor de la variable en el punto C en función a la matemática:

$$P_x = \left(\frac{BC}{AB}\right) * (P_2 - P_1) + P_1$$

Otra forma de evaluar es con el Criterio del Punto más Próximo, en donde el parámetro de un punto específico medio entre otros dos puntos tiene un valor igual al valor hallado en una muestra cercana (Universidad Nacional San Juan, 2020, p. 06). Se muestra en la Figura 5 el criterio del punto más próximo.

**Figura 5** *Criterio del punto más Próximo*



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad e San Juan, 2020, p. 06.

### ***Modelo de bloques***

Duke y Hanna (2014) sostienen que el modelo de bloques consiste en esquematizar mediante el uso de software un depósito de recursos minerales en el cual se debe especificar la superficie geológica existente, posteriormente, se rellena esa área con bloques, a los cuales se les designa valores de grados y otras características (límites de veta, estructura, distribución espacial, etc.) en función a la estimación. Dentro de la planificación minera, la fase de modelamiento juega un papel crucial, puesto que al realizar un modelado correcto se extrapola la viabilidad de la minería, debido al hecho que se logró establecer e interpretar características geológicas para formar una base de datos de estimación. Además, el método de componer mediante bloques los recursos minerales con el modelamiento, se aplica al relacionar elementos medulares de la geología y los requisitos para modelar según sea el depósito de recursos minerales, ya sea, de carbón, veta de metales preciosos y depósitos de pórfido Cu-Au. Cabe recalcar que, la precisión de los elementos geológicos claves que requiere un modelo de bloques, conlleva a que se derive de manera correcta la estimación de recursos de tonelaje y ley del mineral (pp. 145-153).

Poniewierski (2019) indica que el modelo de bloques es una representación sintetizada de un cuerpo mineral y su entorno espacial, una analogía de este modelo es una pared de ladrillos, donde cada ponente (celda) posee una estimación de datos, así como el grado de elementos existentes, densidad y otras características geológicas. El modelo de bloques está sistematizado de manera tridimensional XYZ, donde el tamaño de cada celda es de dimensiones variables, es decir no son de tamaño regular. Entonces, para la metodología de estimación se aplican diferentes procedimientos matemáticos como: Distancia inversa al cuadrado, Kriging ordinario, Kriging indicador múltiple, etc. (pp. 4-5).

Antoine (2011) establece que el modelo de bloques posee tres prácticas importantes para su realización, tales como: Estimación de las propiedades de unidades geológicas en la superficie estudiada, desarrollar la calificación de cada cuerpo de roca (facies) y combinar los resultados mediante ciertas técnicas para calificar al bloque. El modelo de bloques, tienen la característica de establecer para cada bloque un parámetro para obtener información específica (p. 03).

### **1. Técnicas para controles geológicos de la modelización de bloques**

Las técnicas en la fase de control geológico contribuyen en adecuar el modelo de bloques a las singularidades de la zona estudiada. Cram (1992), categoriza estas técnicas en dos:

- Métodos para establecer los dominios (límites geológicos), tales como zona de fallas, zonas de menas degradadas y zonas de residuos internos.
- Modelización de algoritmos para interpolar la distribución espacial de grados y otros atributos dentro de los dominios preestablecidos.

### **2. Dominios geológicos**

Con el fin de generar un control en las variables geológicas, se crean límites geológicos, técnicamente, llamada dominios, los cuales corresponden a zonas donde existe homología geológica y estadística. Existen dos tipos de dominios, de grado y geológicos (Duke & Hanna, Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation, 2014).

- Dominios de grado: Este tipo de dominio se presenta cuando se toma como grado de indicador de mineralización al valor más bajo, que se encuentra luego de seleccionar intercepciones existentes en cada pozo. Otra forma de definir este límite, consiste en encontrar el valor mínimo de los ensayos de

composición sobre una longitud de intervalo mínima. Generalmente, este método se aplica de manera sencilla cuando los depósitos son de solo un metal.

- **Dominios geológicos:** Dentro de este tipo de dominio se analizan diversos parámetros como la litología, las fallas, las vetas, etc.

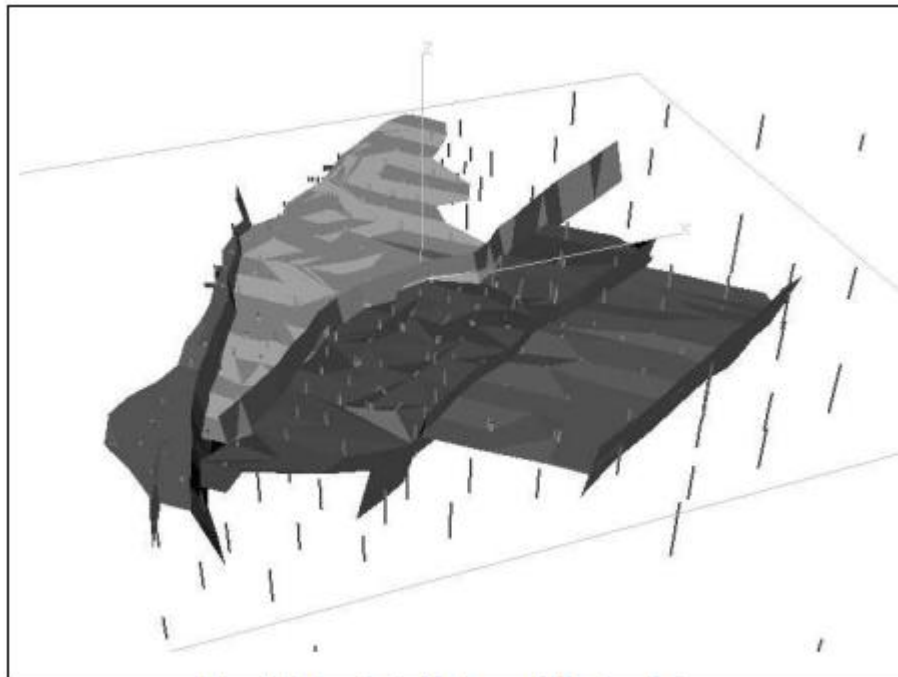
Los límites de dominio también se categorizan en dominio duro, donde las áreas limitadas por el suelo de la costura y el techo son afiladas; dominio blando, donde los límites entre el mineral y sus desechos suelen ser difusos o de forma gradual (Duke & Hanna, 2014, p. 146).

### **3. Metodologías para definición de límites**

La geometría de los dominios delimitada como un sólido tridimensional, proveniente de los límites que generan conexiones, se puede estructurar siguiendo ciertas metodologías (Universidad Nacional San Juan, 2020).

**Sólidos de armazón de alambre:** Consiste en interconectar con un cable los contornos geológicos formados en secciones o planos, genera una geometría sólida en 3D más fácil de interpretar. La Figura 6 presenta como se realiza el armazón de alambre en los sólidos.

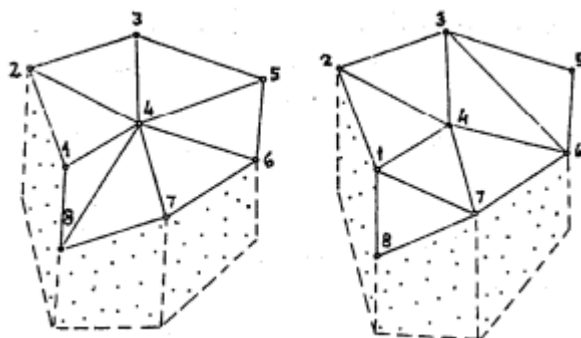
**Figura 6 Wireframing**



*Nota.* Tomado de “The Art and Science of Resource Estimation”, presentado en Coombes Capability por Jacqui Coombes, 2008, p. 161.

**Triangulación de superficies:** Tiene el principio de formar estructuras a partir del techo y suelo de la superficie, a través de una línea recta. En otras palabras, conecta los puntos de placas triangulares estructurando placas en forma de triángulo. Se debe mantener la equilateralidad de los triángulos, con el fin de evitar errores en las evaluaciones (Universidad Nacional San Juan, 2020). La Figura 7 representa la metodología de triangulación de superficies.

**Figura 7 Método de los triángulos**



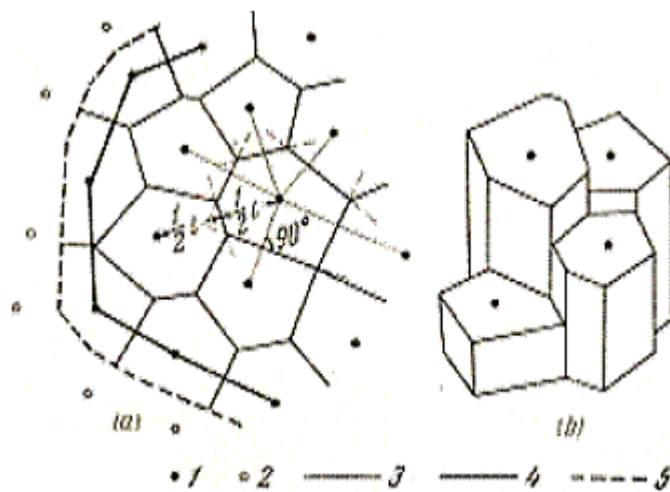
*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 10.

**Bloques de explotación:** Se utiliza en yacimientos que tienen filamentos y se les divide en grupos de bloques, entonces para calcular la potencia, se utiliza la media aritmética de las leyes, de esta forma se obtiene un valor medio para cada bloque.

**Polígonos:** Consiste en generar polígonos de influencia alrededor de la muestra, cada polígono tiene una ley y espesor constante, también son equivalentes a la potencia y ley media de la muestra. En la Figura 8 se aprecia el método de los polígonos.

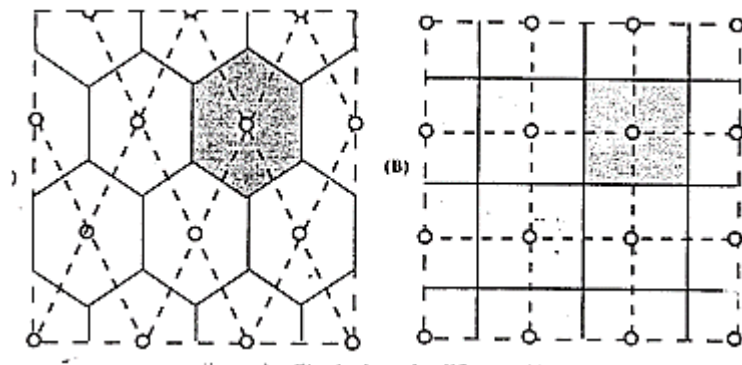
**Figura 8** Método de los polígonos

*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 08.



En un espacio tridimensional, ya sea la potencia de mineralización o longitud de sondeo tienen un valor igual a la altura del prisma base de los sólidos que se forman con un respectivo volumen. La Figura 9 muestra los sondeos en malla regular.

**Figura 9** Sondeos en malla regular



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 09.

Al emplear este modelo, se calcula el tonelaje del mineral (T) en función a la superficie del área de influencia (S), potencia del yacimiento (P) y el peso específico ( $\rho$ ).

$$T = S * P * \rho$$

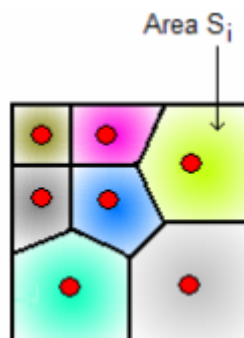
También, se puede calcular la cantidad de metal del bloque (Q), considerando la variable tonelaje (T) y la ley del mineral (z).

$$Q = T * z$$

Se presenta una parte del terreno dividida en secciones de área ( $S_i$ ) y cada parte tiene una ley diferente ( $z_i$ ).

La figura 10 representa a la división del yacimiento en polígonos.

**Figura 10** Yacimiento dividido en polígonos



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 09.

Para determinar las reservas globales, es necesario plantear otra expresión matemática que utilice cada área del polígono para sus cálculos.

$$Z_S = \sum_{i=1}^n z_i S_i * \left( \sum_{i=1}^n S_i \right)^{-1}$$

**Rejillas:** Conecta las bases y cimas de las intersecciones extraídas de los pozos de perforación, mediante puntos de datos. Esta técnica tiene una precisión mayor que otras.

#### 4. Estadística de datos

Técnica empleada para estructurar, interpretar y analizar la distribución de los datos de las muestras del grado por cada dominio. Cabe recalcar que, se debe revisar los datos antes de su análisis estadístico, puesto que la agrupación de diversos datos que no fueron contrarrestados, genera resultados desalentadores con bajo índice de interpretación.

En caso exista una distribución regularizada es recomendable utilizar histogramas y gráficas de probabilidad. Por lo expuesto, se analizan las medidas estadísticas como, la mediana, media, varianza, valores máximos – mínimos y coeficiente de variación, el cual indica la relación entre la media y la desviación estándar calculada (Duke & Hanna, 2014).

- **Media aritmética:** Mediante la media aritmética se estima la ley media de un área, promediando las leyes de los datos obtenidos (Universidad Nacional San Juan, 2020). Las leyes de los datos ( $Z_i$ ) que se encuentran dentro de un área (S), se deben promediar mediante la fórmula:

$$Z_S = \sum_{i=1}^n z_i * (n)^{-1}$$

$n$ : Representa a los pesos de los datos

Duke y Hanna (2014) plantean que para comprobar si es conveniente utilizar los valores de los datos o transformar esos datos a logaritmos, se recomienda utilizar gráficos de distribución acumulativa. También, se utiliza este tipo de gráficos cuando hay múltiples poblaciones. Para hallar el grado de correlación entre dos variables específicas se utilizan las gráficas de dispersión (p.147).

Casanova (2017) explica que el hecho de recolectar diferentes datos de cada dominio preestablecido, genera que exista una metodología para analizar la distribución espacial de los datos mediante histogramas.

- Histograma: Gráfica que agrupa la distribución de un conjunto de medidas que permite connotar la variabilidad de los datos (p. 66).

## 5. Parámetros del modelo de bloque

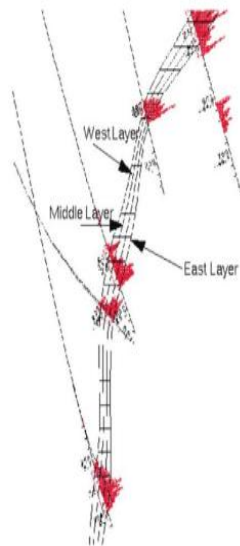
Canadian Securities Administrators (2020) considera que los parámetros principales que se deben considerar para el modelado son: la distribución de los datos informativos, junto con el tamaño del bloque, la ubicación y la geometría de las zonas mineralizadas, soporte del bloque. Por otro lado, para construir un modelo tridimensional es imperativo seleccionar correctamente los datos para su correcto análisis, finalmente, se puede estimar la mineralización existente en la zona (Coombes, 2008).

**Efectos de soporte e información:** Se conoce como soporte al volumen que cubre la función que se ha modelado. El efecto se hace notorio en menor proporción cuando el modelo de bloques es grande o los datos del muestreo son abundantes (Khrorram, Asghari, Memarian, Morshedy, & Emery, 2021).

**Bloques para modelos de tonelaje:** Una recomendación en relación a los límites duros en que sus tamaños sean pequeños para modelar su geometría de manera correcta, pues se tendrá mayor precisión volumétrica entre el espaciado del pozo con los límites del dominio. Acorde con Duke y Hanna (2014) los modelos de costura pueden ser considerados como modelos de bloques de espesor variable, según sea la costura, ya que se considera los parámetros de techo, suelo y rejillas de espesor.

**Bloques para modelos de ley:** Para este tipo de bloques es recomendable estandarizar un tamaño para todos los bloques, es decir que no sean menores por una cantidad exorbitante al tamaño promedio de los bloques en conjunto, es así como, se modela la distribución de grados dentro de un dominio (Duke & Hanna, 2014, pág. 149). En la Figura 11 se ve el modelado de bloques de una sección.

**Figura 11** Modelo de bloques de una sección

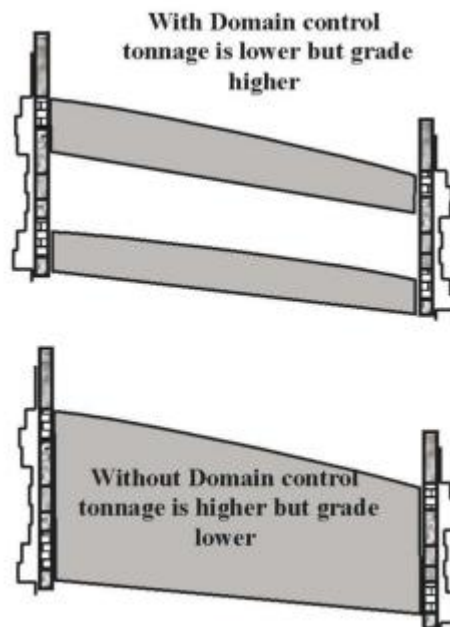


*Nota.* Tomado de “Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation”, presentado en The AusIMM Guide to Good Practice por Duke y Hanna, 2014, p. 149.

**Controles sobre la estimación de la ley de bloque:** La interpretación geológica adecuada se logra solo si existe un control en el proceso de modelado de

los grados a través de ciertas técnicas, como, por ejemplo: Control de dominio, Esa técnica estipula asignar valores equivalentes a los bloques y a los números de dominios existentes, para lograr un control geológico básico, puesto que, por lo preestablecido en el dominio, solo existirán valores que se encuentren dentro del mismo. La fijación de límites de dominio, evita la variación de los grados de veta, ya que, controla que no se encuentren próximos a los dominios de desechos (Duke & Hanna, 2014, pág. 150).

**Figura 12** Grado de estimación con o sin control de dominio



*Nota.* Tomado de “Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation”, presentado en The AusIMM Guide to Good Practice por Duke y Hanna, 2014, p. 150.

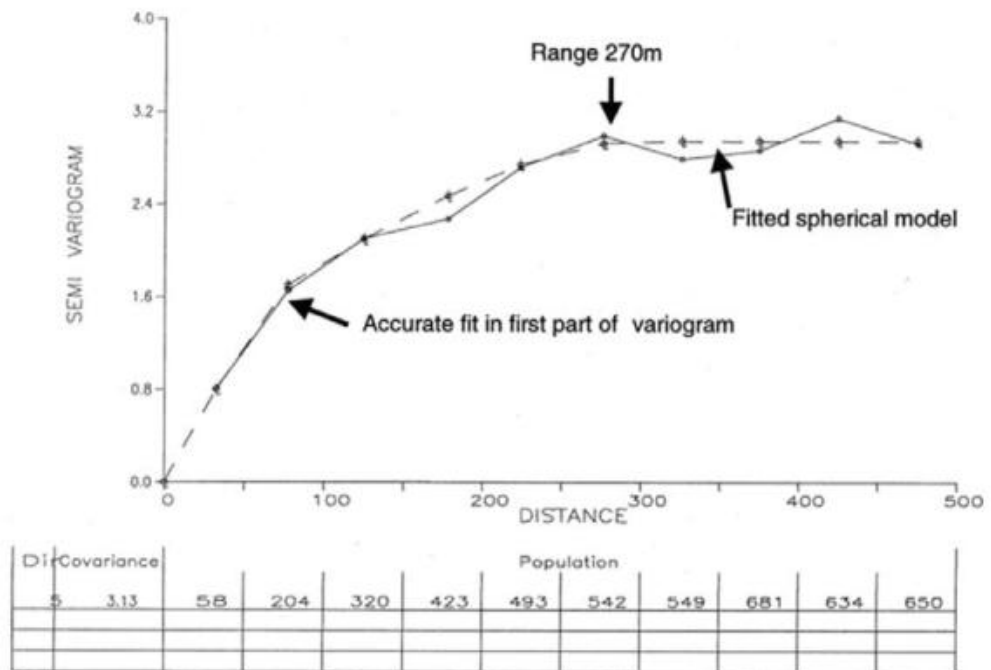
**Comprobación del modelo de grado de bloque:** Para comprobar si el modelamiento es correcto se debe cotejar los datos del pozo con los demás datos existentes mediante un trazado sistemático de las secciones, los planos y vistas tridimensionales del área estudiada (Duke & Hanna, 2014, pág. 150).

**Análisis estadístico:** Según Guibal (2001) las estadísticas y la variografía deben respaldar la elección de los dominios. El análisis del espacio existente entre los datos, las tendencias generadas por los mismos, ya sea cuando se formaron en secciones, planos, sólidos 3D, solo se lleva a cabo al emplear la estadística y el análisis de variogramas (Isaaks & Srivastava, 1989, págs. 140-183).

Para obtener calificaciones correctas para el bloque, se deben realizar cálculos utilizando una herramienta matemática común como el algoritmo en base al promedio local de las muestras analizadas, estableciendo un alcance de búsqueda. Algunos ejemplos de técnicas de ponderación son distancia inversa, Kriging para un indicador, bloque, punto o lognormal de los datos (Duke & Hanna, 2014, pág. 150).

**Variografía:** Herramienta utilizada para confirmar la distribución de datos, puesto que basa sus resultados en función a los cálculos de variogramas experimentales. Además, mediante el gráfico variográfico se puede apreciar a distribución espacial de los grados de manera real. Existen algunas prácticas específicas para modelar variogramas, tales como centrarse en el punto de origen para mayor precisión, modelar empleando el diseño esférico, para buscar zonas anidadas, verificar la distribución de los datos en relación a su índice de rango, finalmente, definir el efecto pepita (Duke & Hanna, 2014, pág. 148).

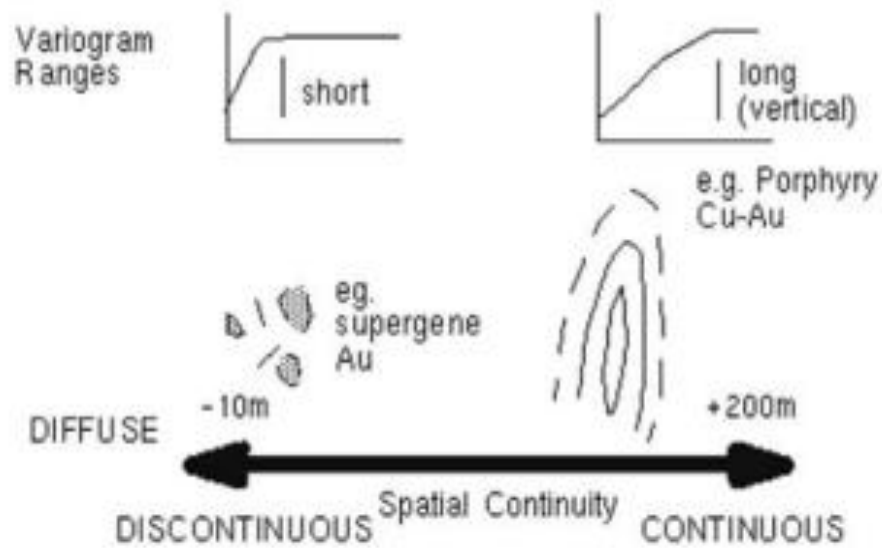
**Figura 13** Variografía de una base de metal a 270 metros



*Nota.* Tomado de “Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation”, presentado en The AusIMM Guide to Good Practice por Duke y Hanna, 2014, p. 148.

**Grado de continuidad dentro de los dominios:** La continuidad espacial connota una fluctuación según sea la naturaleza del metal, se logra obtener información de la misma a través de variogramas. No obstante, algunos datos que no representan al dominio, generan un conflicto en la interpretación de variogramas, debido al hecho que pudo haber errores en el muestreo, agrupamiento de datos, etc. (Duke & Hanna, 2014, pág. 148). En la Figura 14 se representa la continuidad de grados.

**Figura 14** Variografía de una base de metal a 270 metros



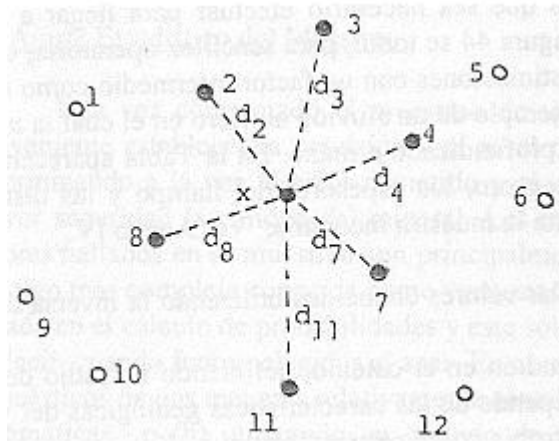
*Nota.* Tomado de “Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation”, presentado en The AusIMM Guide to Good Practice por Duke y Hanna, 2014, p. 149.

### *Leyes interpoladas*

#### **1. Distancia inversa**

La ejecución de esta técnica, tiene como fundamento asemejar la distancia con el grado del bloque, es decir, las muestras más cercanas tienen un valor demasiado aproximado al grado del bloque, mientras que las muestras más alejadas tienen un valor diferente. Puesto que, las muestras con proximidad al punto de estimación tienen más peso, por lo tanto, la probabilidad de semejanza es mayor en esos puntos, razón por la cuales invierten las distancias para controlar estas muestras cercanas. Para asegurar la imparcialidad de la estimación del grado, en relación a los grados de la muestra, se realiza un nuevo escalonado, de manera que, todas las distancias invertidas de separación sumen uno (Poniewierski, 2019).

**Figura 15** Método de la distancia ponderada



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 12.

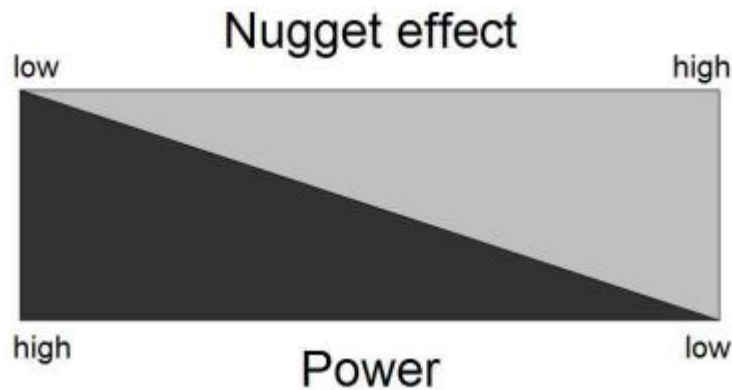
Para hallar el valor medio de la variable ponderada ( $z_m$ ), en función de la distancia entre cada sondeo y el epicentro del bloque ( $d_i$ ) con las muestras ( $z_i$ ) y una potencia respectiva ( $n$ )), se presenta una fórmula general de estimación:

$$z_m = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \left(\frac{1}{d_i}\right)^n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^n}$$

- **Selección de una potencia:** Seleccionar una potencia, motiva a que las muestras se reproduzcan fácilmente, pueden ser: distancias inversas al cuadrado (IDWS), distancias inversas al cubo (IDWC), etc. Un indicador para establecer el valor correcto a la potencia es basarse en el efecto pepita, pues cuando este efecto tiene un valor bajo, indica que la reproducibilidad de los datos de la muestra es óptima, por lo tanto, utilizar las muestras más cercanas al punto de estimación es idóneo, pues su valor será similar al del grado del punto estimado. Por otro lado, si el efecto pepita tiene un valor alto, se connota una baja reproductibilidad de las muestras, entonces las distancias cercanas no se asemejarán al grado del punto de estimación, por lo expuesto, se recomienda

usar una potencia de valor bajo (Coombes, 2008). En la Figura 16 se muestra la relación del efecto pepita con la potencia.

**Figura 16** *Relación del efecto pepita con la potencia*



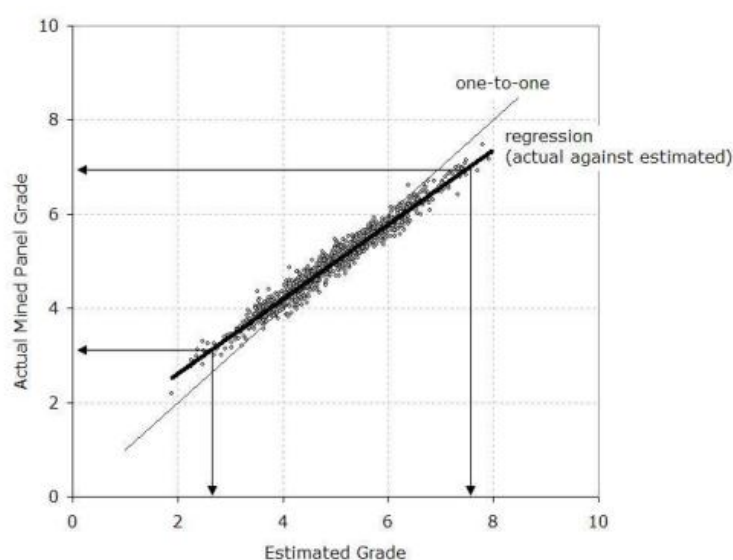
*Nota.* Tomado de “The Art and Science of Resource Estimation”, presentado en Coombes Capability por Jacqui Coombes, 2008, p. 149.

- **Definición del barrio de búsqueda:** Con el fin de garantizar y desarrollar una estimación correcta, se plantea diversos criterios lógicos para definir el barrio de búsqueda.
  - Deben existir entre 30 a 40 muestras para que se logre generar una estimación precisa.
  - Considerar el efecto pepita para determinar la potencia en la distancia inversa.
  - Basarse en el variograma para determinar los rangos del elipsoide de búsqueda.
  - La continuidad de mineralización debe tener una misma dirección con el elipsoide de búsqueda.

### ***Kriging ordinario***

El ingeniero de minas Danie Krige, basa su descubrimiento en el efecto volumen-varianza, pues las comparaciones empíricas que realizó entre los grados estimados y los grados reales, seguían un patrón estable, pues existía una relación indirectamente proporcional entre los grados previstos y estimados, en otras palabras, los grados altos estimados arrojaban un valor menor al grado estimado previsto, mientras que, los grados bajos estimados mostraban un valor mayor al grado previsto (Coombes, 2008). En la Figura 17 se muestra la observación de Krige.

**Figura 17** Observación de Krige entre los recursos estimados y los valores reales



*Nota.* Tomado de “The Art and Science of Resource Estimation”, presentado en Coombes Capability por Jacqui Coombes, 2008, p. 150.

### ***Técnica de Kriging ordinario***

Poniewierski (2019) relata que: “Los ingenieros Georges Matheron y Danie Krige, establecieron una técnica de estimación lineal global para todos los métodos de estimación, puesto que utiliza cualquier correlación espacial que pueda existir entre los puntos de muestra para informar la ponderación de los efectos de los puntos de muestra en un punto de predicción.” (pág. 11).

El método Kriging ordinario establece dos condiciones para ejecutarse:

- La menor diferencia general entre el grado previsto y el grado real.
- Estimación no sesgada (la suma de los pesos de muestreo equivale a uno).

Para aplicar este método Kriging, se establece un punto base con  $N$  valores  $[z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_N)]$ . Entonces, para estimar la variable, se establece la función lineal  $Z(x)$ , se establece la incógnita  $V$  que representa a un punto en el depósito, donde al sacar el promedio de una región determinada  $Z(v)$  obtenemos la siguiente expresión:

$$Z_v = \frac{1}{V} \int_v Z(x) dx$$

Para la estimación, del promedio de la región determinada  $Z(v)$ , ponderan todos los datos de la siguiente manera, asignando los pesos con la variable  $\lambda_i$ :

$$Z_v^* = \sum \lambda_i z(x_i)$$

La media del error de estimación  $E[Z_v^* - Z_v]$  se expresa con la expresión:

$$E \left[ \sum \lambda_i z(x_i) - Z_v \right] = \sum \lambda_i m - m = m \left[ \sum \lambda_i - 1 \right]$$

Se tienen dos casos donde la media ( $m$ ) es conocida, dando lugar al Kriging simple (KS). Por otro lado, cuando no se conoce el valor de la media ( $m$ ) pero se sabe que la sumatoria de los pesos  $\lambda_i$  es igual a 1, se da origen al Kriging Ordinario (KO).

Cumpliendo con la condición de que la varianza de error  $E[Z_v^* - Z_v]$  sea mínima. Se desliga la expresión de varianza de Kriging:

$$\sigma_k^2 = \sum \lambda_i \underline{\gamma}(x_i, V) - \underline{\gamma}(V, V) + \mu$$

Donde  $\mu$  representa a los multiplicadores de Lagrange (Porrás, 2017, pág. 4).

Amstrong (1998) plantea los pasos para calcular la varianza Kriging:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \underline{\gamma}(x_i, V) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Reiterando que la sumatoria de los pesos establecidos es igual a 1:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Las variables utilizadas poseen la siguiente nomenclatura:

- $\lambda_j$ : Pesos asignados en la combinación lineal del estimador a cada observación  $j$
- $\gamma(x_i, x_j)$ : Valor de la función del modelo teórico del variograma obtenido
- $\underline{\gamma}(x_i, V)$ : Valor de la función del variograma evaluado por la distancia de separación entre las observaciones ( $x_i$ ) y el punto a interpolar – volumen ( $V$ )

Coombes (2008) sostiene que la varianza puede ser representada por:

- Punto para bloquear la variabilidad: Consiste en medir los valores del variograma para cada uno de los puntos de discretización de la muestra.
- Suma de la variabilidad de bloqueo ponderada por las ponderaciones de kriging: Se basa en la suma de todas las variabilidades de bloqueo de la muestra, aplicando la ponderación según la influencia que cada muestra ha tenido en la estimación
- Variabilidad dentro de un bloque: Trata de calcular la media de los valores del variograma basados en las distancias entre cada punto discreto dentro del bloque.
- Multiplicador LaGrange: Sirve para determinar la varianza de Kriging, pues si el multiplicador LaGrange tienen una relación directamente proporcional.

El resultado de la serie de ecuaciones, donde se trata de calcular el valor de los pesos, se resume en forma de matriz presentada en la Figura 18.

**Figura 18** Matriz del sistema de varianza Kriging

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2N} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, V) \\ \gamma(x_2, V) \\ \dots \\ \gamma(x_N, V) \\ 1 \end{bmatrix}$$

*Nota.* Tomado de “Método Kriging de inferencia espacial”, presentado en Centro de Investigación en Geografía y Geomática por Porras, 2017, p. 05.

Coombes (2008, pág. 153) establece de otra forma de expresar la matriz en la Figura 19.

**Figura 19** Sistema de matrices de varianza Kriging

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \dots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{12} & C_0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ \gamma_{13} & \gamma_{23} & C_0 & \dots & \gamma_{3n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{1n} & \gamma_{2n} & \gamma_{3n} & \dots & C_0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \times \begin{matrix} \begin{matrix} \text{weights} \\ \text{sample to block} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \text{weight}_2 \\ \text{weight}_3 \\ \text{weight}_4 \\ \dots \\ \text{weight}_n \\ \mu \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{bmatrix} \bar{\gamma}_1 \\ \bar{\gamma}_2 \\ \bar{\gamma}_3 \\ \dots \\ \bar{\gamma}_n \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

*Nota.* Tomado de “The Art and Science of Resource Estimation”, presentado en Coombes Capability por Jacqui Coombes, 2008, p. 153.

Esta autora expresa el sistema de matrices con la siguiente nomenclatura:

- La primera matriz, resume los valores de variogramas “ $\gamma$ ” y los números junto al variograma representan a el número de muestra donde se hace la comparación.
- El  $C_0$  es la abreviatura del efecto pepita.
- $\bar{\gamma}$  representa la discretización de la muestra.
- Entonces, al medir la variabilidad entre una muestra y todos los puntos de discretización dentro de un bloque, el sistema de Kriging está aplicando una corrección de varianza de volumen.

- El sistema de Kriging genera pesos ( $\mu$ ) que aseguran una estimación lineal imparcial.

Cabe recalcar, que para realizar estos cálculos se debe previamente construir los variogramas de manera precisa, con el fin de controlar los pesos para señalar el único valor del dominio.

### ***Densidad de roca***

Coombes (2008, pág. 188) estipula que la variable muestreada muestra diversos parámetros como la densidad. Entonces, al aplicar ecuaciones de regresión para estimar la densidad de los bloques es posible estimar el tonelaje de mineralización en el recurso.

#### **2.2.4. Metodología de interpolación**

Poniewierski (2019) detalla que: “Un método de interpolación lineal los valores de datos específicos en estas ubicaciones no intervienen con las ponderaciones asignadas a cada una de las ubicaciones de una muestra específica dentro de la estimación. Un método no lineal intentará estimar la proporción de bloques pequeños que exceden un valor de corte dado dentro de un bloque más grande.” (pág. 11).

Entonces, se connota que los estimadores geoestadísticos no lineales tienen una singularidad en común con los estimadores lineales, pues estos asignan pesos a muestras que son funciones de las propias calificaciones; en otras palabras, no dependen únicamente de la ubicación de los datos (Duke & Hanna, 2014).

La continuidad de grado, da inicio a una división entre:

- a) Modelo Mosaico: La continuidad es de grado inconexo.
- b) Modelo difuso: Los grados presentados tienen una distribucional gradual.
- c) Modelo de tipo residual indicador: En el cual se combinan el modelo mosaico (grados de valor mayor) y fusionado (grados de valor menor).

## ***Indicador Kriging***

Herramienta útil cuando existen poblaciones diversas o zonas estructurales de mineralización (Coombes, 2008).

### **1. Análisis de datos para kriging indicador**

En esta fase, se pretende la demostración adecuada de la integración espacial de las poblaciones, describir inflexiones (percentiles) y de los modos, evaluación de la difusión de grados inferiores y superiores tridimensionalmente (Coombes, 2008).

### **2. Codificación de indicadores**

Consiste en establecer códigos binarios para cada percentil calculado en función a la base de datos. La función de codificación es:

- Si una calificación de muestra es menor que la calificación de indicador, establezca el código en "1".
- Si una calificación de muestra es mayor o igual que la calificación de indicador, establezca el código en "0".
- El codificado sirve para crear una gama de umbrales (Coombes, 2008, pp. 161-162).

### **3. Estimación de indicadores**

Los indicadores se complementan con la probabilidad estimada para sumar un 1, esto significa que, al existir un cierto valor de probabilidad, este mismo representará el porcentaje de que el grado sea inferior al valor del indicador. Los códigos estimados estarán entre cero y uno y representan una probabilidad de que el grado desconocido sea menor que el grado indicador. Los códigos Kriged son esencialmente un promedio similar, solo cada código de muestra se pondera de acuerdo con el variograma indicador respectivo. Generalmente, el promedio del

intervalo superior esta sesgado, por lo cual es necesario utilizar la mediana para los cálculos (Coombes, 2008, pág. 167).

#### **4. Relaciones de orden**

Se debe tener en cuenta el orden de parámetros de estimación al estimar, pues si la probabilidad de que la estimación sea menor que el indicador de valor alto, sea inferior, a la probabilidad de que el indicador de valor pequeño sea menor que el de estimación obtenido. De esta manera, para evitar problemas de relación de orden se deben realizar cambios graduales en los parámetros del variograma (Coombes, 2008, pág. 171).

#### **5. Variografía de indicadores**

Técnica que utiliza los códigos (umbrales) en lugar de los grados para el análisis de datos. Los parámetros establecidos en esta técnica deben tener un valor que fluctúe entre cada indicador, con el fin de evitar errores en la estimación, como varianzas negativas, efecto pepita alto, etc. Para hallar una correlación entre los indicadores de valor alto y bajo, se utiliza el variograma de indicador cruzado (Coombes, 2008, pp. 167).

#### **6. Efecto volumen-varianza**

Coombes (2008) describe al efecto volumen-varianza como se incrementa la dilución de grado, a medida que, se seleccionan volúmenes más grandes. Este efecto diluyente se relaciona con la disminución de la selectividad, pues cuando exista más volumen, menor será la variación de los grados. Por lo cual, al momento de minar un área se debe ajustar la estimación para conseguir un volumen idóneo (p. 165).

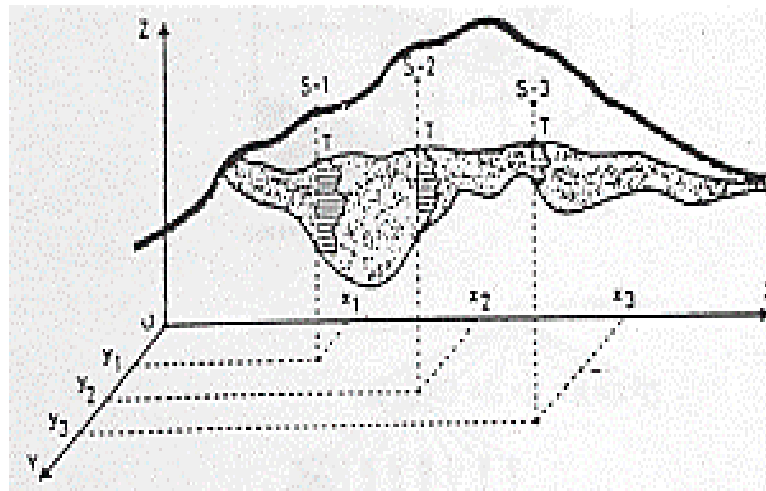
### 2.2.5. Procedimiento para generar un modelo de bloques

Dentro del modelo de bloques, cada celda es representada con unidades de exploración (paralelepípedos iguales) dentro del área evaluada, con variaciones según sea la zona. Las mismas unidades de exploración cambiarán su nomenclatura a unidades de explotación cuando comience la siguiente fase (Universidad Nacional San Juan, 2020, pp. 13-15).

#### *Fases para la construcción del modelo*

- a) Recolectar datos de las formaciones geológicas a analizar, para formar una base de datos de los sondeos, referenciando con sus coordenadas de ubicación en los tres ejes (x, y, z) respecto a un origen (Universidad Nacional San Juan, 2020). La Figura 20 presenta la recolección de datos geológicos.

**Figura 20** *Recolección de datos geológicos*



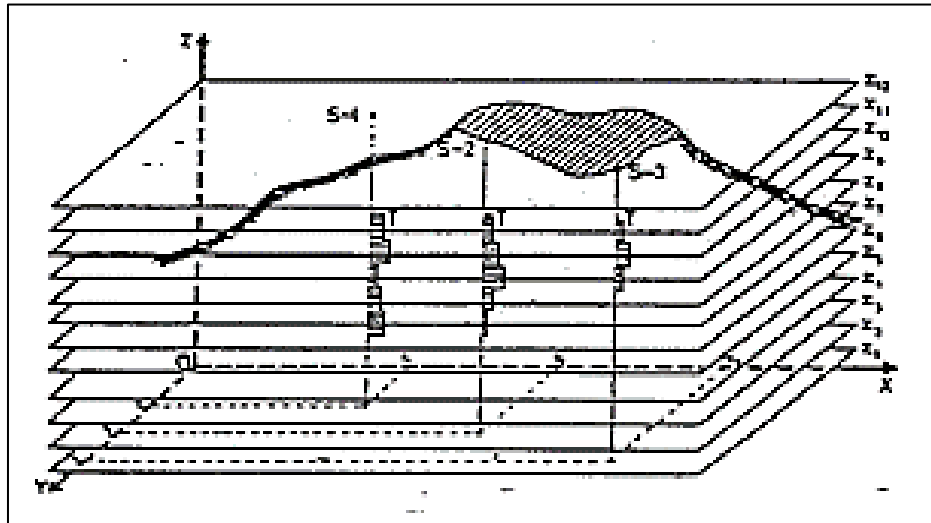
*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 13.

- b) Dividir el yacimiento en planos horizontales que se separen con la misma distancia (equidistantes), calcula el promedio de los sondeos que posean tramos que

coincidan bajo la separación de planos (Universidad Nacional San Juan, 2020). La

Figura 21 representa la división del yacimiento.

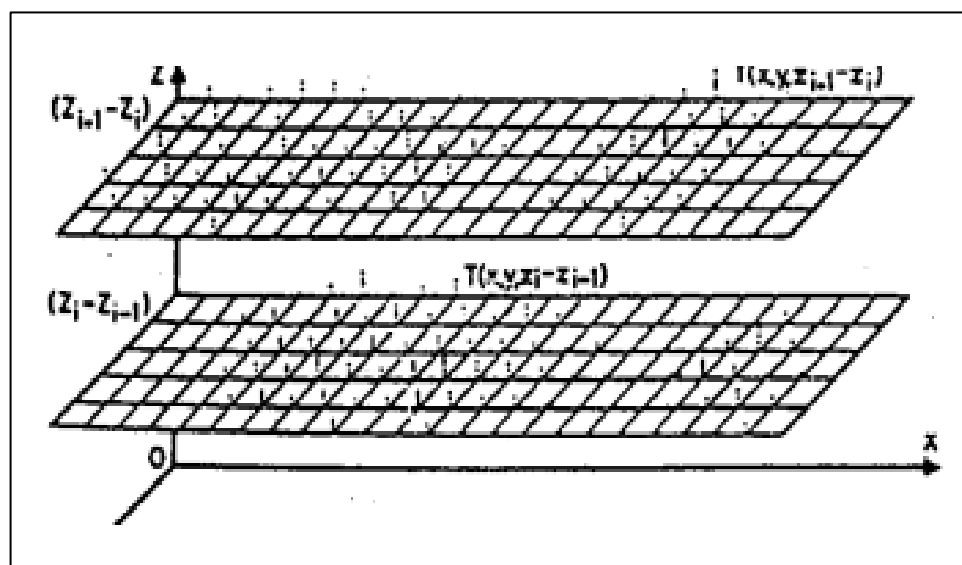
**Figura 21** División del yacimiento



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 14.

- c) Sobre cada plano horizontal se traza una malla regular y en cada vértice de la misma (centro de un paralelogramo) se estiman los atributos de la mineralización (Universidad Nacional San Juan, 2020). En la Figura 22 se observa el trazo de mallas regulares.

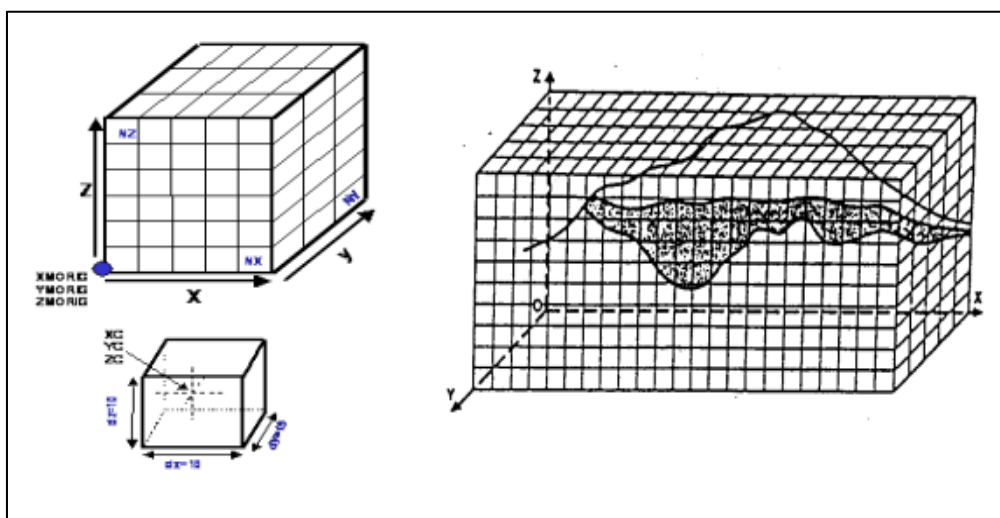
**Figura 22** Trazo de mallas regulares



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 14.

- d) Localizar cada bloque en planos X, Y, Z. Donde la base es la abertura entre la malla y la altura (Universidad Nacional San Juan, 2020). La Figura 23 representa la localización de los cubos.

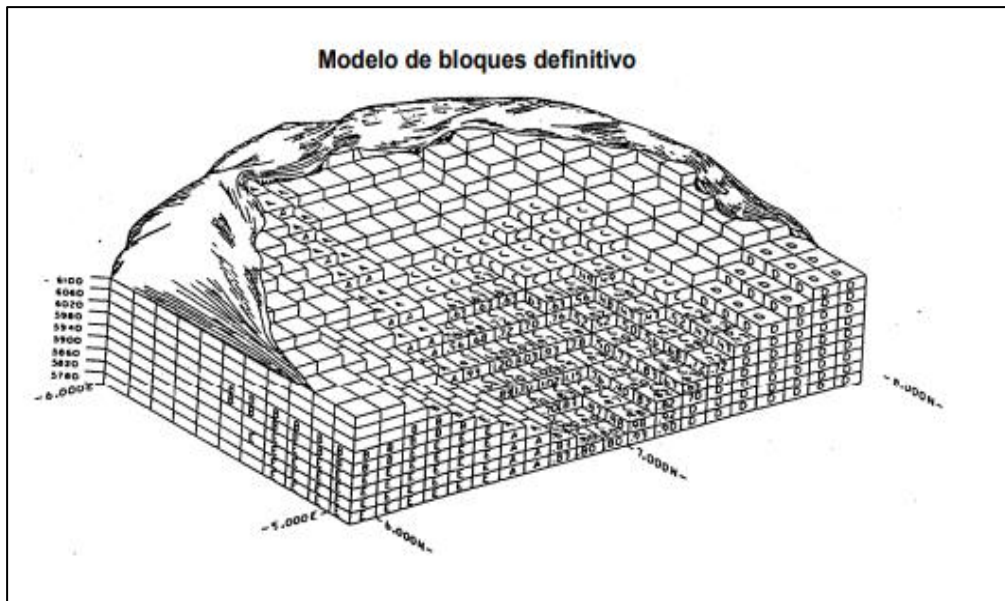
**Figura 23** Localización de los cubos



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 14.

- e) Representar el yacimiento por una serie de valores (atributos) asignados a cada bloque (Universidad Nacional San Juan, 2020). La Figura 24 representa al yacimiento en bloques.

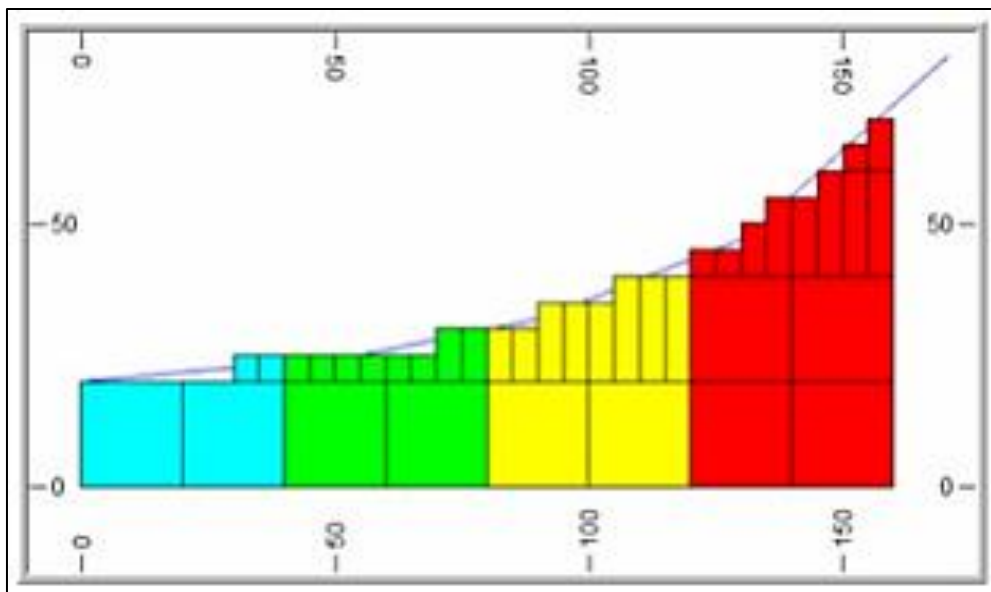
**Figura 24** Representación del yacimiento en bloques



*Nota.* Tomado de “Modelación-Estimación de reservas”, presentado por Universidad de San Juan, 2020, p. 15.

- f) Para mejorar los límites del modelo se recomienda subdividir los bloques en cuboides pequeños (Poniewierski, 2019). En la Figura 25 se observa la subdivisión de los bloques.

**Figura 25** Subdivisión de bloques

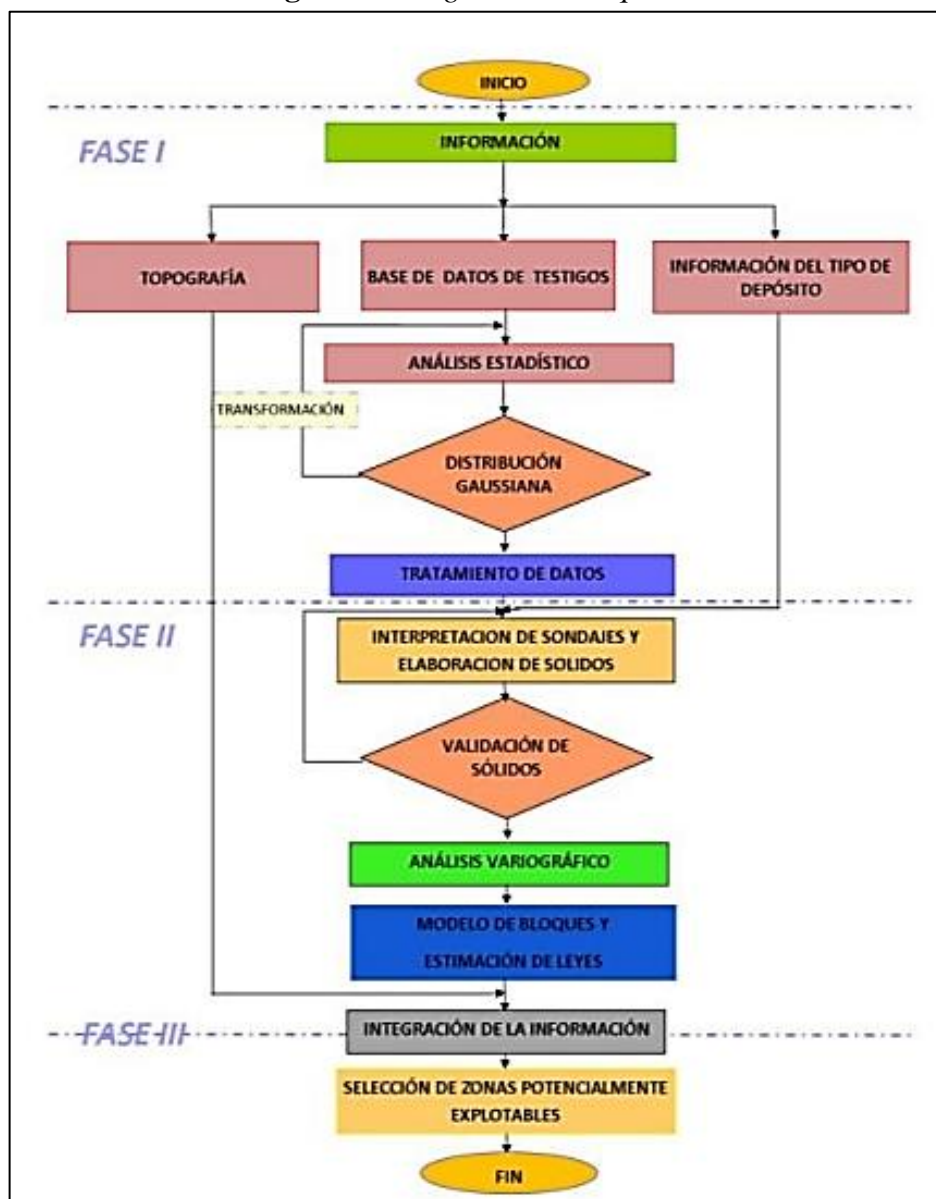


*Nota.* Tomado de “Block model knowledge for mining engineers – an introduction”, presentado en The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (CP) - Deswik por Julian Poniewierski, 2019, p. 05.

***Fases para realizar un modelamiento geológico con modelo de bloques***

Tituana-Baren y Pindo-Macas detallan los procesos en un diagrama de bloques en la Figura 26.

**Figura 26** Diagrama de bloques



*Nota.* Tomado de “Modelamiento de bloques de un yacimiento cuprífero para la selección de zonas de interés potencialmente explotables”, presentado en X CONGRESO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPE por Tituana-Baren y Pindo-Macas, 2015, p. 130.

### ***Estimación de recursos***

La estimación de recursos está conformada por diversos pasos: Adquisición y gestión de la información, modelamiento geológico, estimación de variables, categorización y conciliación. Este proceso tiene la finalidad de estructurar un modelo para predecir la cantidad, calidad y distribución del material de la zona a estudiar, esta etapa se lleva en la fase de exploración minera. En todo momento se deben desempeñar actividades de revisión, validación y documentación, para cumplir con todas las etapas de manera correcta y según sea el caso practicar la mejora continua (Sulistiyana & Ali Amri, 2016).

La estimación de recursos de un yacimiento presenta por objetivo establecer la proporción existente de recurso mineral para comenzar la explotación comercial, de los componentes que posee, ya sea, metalífero, no metalífero, combustible, etc. El proceso de modelar el yacimiento en análisis, se estima durante toda la vida útil de la mina. Sin dejar de lado, los factores de modificación que se pueden ver involucrados, tales como, los ambientales, socioculturales, mineros, etc. Además, la prospección y exploración son procesos indispensables que se llevan a cabo, en cada fase del proceso de estimación de recursos, incluso se extiende hasta cuando empieza la explotación del depósito. Por otro lado, cuando empiezan las operaciones en mina, suele existir un cambio en las estimaciones calculadas con anterioridad, pues el control de la ley de los minerales se vuelve más exhaustiva.

En líneas generales, la estimación de recurso es el hito principal que señala el éxito de una inversión minera, por lo cual es imperativo calcular con precisión la ley y tonelaje existente en la zona estudiada, para ello, se debe estructurar una base de datos en función a muestras correctamente tratadas, donde exista calidad de análisis y los patrones geológicos estén totalmente establecidos (Universidad Nacional San Juan, 2020) .

Existen tipos 2 tipos de estimación:

- Estimación global: Su metodología estima la ley media y el tonelaje del yacimiento integral.
- Estimación local: Comprende la estimación de ley media de unidades o bloques que se encuentren dentro de un área específica dentro del yacimiento en conjunto.

#### *Etapas de la estimación de recursos*

**Adquisición y gestión de la información:** Castilla y Herrera (2012, pág. 10) detallan que, para el proceso de adquisición, se obtienen datos de la muestra de terreno, las cuales a su vez son evaluadas por geólogos, luego, se les realiza otros tipos de análisis geometalúrgicos, analíticos, etc.

Para la gestión de información, se debe respetar el flujo de procesos, pues se debe registrar todos los datos que se extraen de la muestra (materialidad, trazabilidad, ubicación, subprocesos, etc.) Cabe recalcar que, desde el inicio de la estimación de recursos debe existir un control y aseguramiento de la calidad (QA/QC).

**Muestreo en Terreno y Mapeo:** El muestreo, mapeo del terreno juegan un papel importante en este proceso, pues en esta etapa se establecen las ubicaciones geospaciales, la tipología de las muestras con su propósito de usos en función a la complejidad del yacimiento, etapas del proyecto, atributos geológicos, etc. Para ello es necesario emplear ciertos controles de calidad. Primero, se debe supervisar el terreno

con protocolos de muestreo; segundo, se debe revisar los mapas para apreciar las interpretaciones geológicas de las muestras. Cabe recalcar que, los métodos de muestreo dependen del estado del terreno, existen muestreos de navaja, de cuchara, de testigo, fragmentación por cincel y de corte con sierra de disco (Castilla & Herrera, 2012, pág. 54).

**Preparación y Análisis de Muestras:** Herrera (2018) describe que al realizar un análisis integral a las muestras ayudará a determinar su densidad respectiva, composición fisicoquímica y mineralógica, con el propósito de garantizar que no existirá ningún impacto en el futuro de las reservas minerales. Generalmente, se obtienen muestras representativas de todos los laboratorios, ya sea realizando ensayos geometalúrgicos y geotécnicos. Como el control debe ser riguroso para este tipo de procedimientos, se utilizan herramientas, tales como: Test de heterogeneidad, Test de Ingamells, test de homogeneidad, estándares, blancos, duplicados, diagramas de dispersión, etc. (pág. 25).

**Modelamiento geológico:** Conceptualización del comportamiento de un yacimiento considerando sus características, para ello se utilizan diversas estrategias que ayudan a tomar las decisiones respecto al proyecto (Adeli, Emery, & Dowd, 2018).

**Identificación de Unidades Geológicas:** Zuñiga y Ramírez (2015, pág. 90) explican que los dominios representan características geológicas similares en el espacio y tiempo. Existen dos tipos de aspectos a evaluar pórfidos, uno de ellos son los eventos hipógenos (primarios, dentro de la corteza), el otro son los supergenos (secundarios, zonas minerales, techos y pisos de óxidos, etc.)

**Delimitación de Unidades Geológicas:** Volúmenes en un espacio tridimensional, que deben ser definidos por límites, para que no exista ningún tipo de razón ilógica de geología, es decir, algunas unidades son muy pequeñas y su análisis

otorga resultados ambiguos, razón por la cual se recomienda realizar una dilución geológica (no tomar en consideración este tipo de unidades). Para este procedimiento se utilizan herramientas, tomando, por ejemplo, la extrusión de polígonos, interpretación de secciones y plantas, Kriging indicador, interpolaciones, etc. (Zuñiga & Ramírez, 2015, pág. 93)

**Validación del Modelo Geológico:** Revisión de la consistencia de los datos con la interpretación brindada, que dará como resultado el modelo geológico del tonelaje estimado del yacimiento. Se elige el modelo en el cual no exista sesgo y se haya considerado, diferentes aspectos que podrían provocar una variabilidad en el tonelaje estimado. Las herramientas empleadas para este proceso son el análisis de proporciones, secciones de control, reinterpretación, evaluación de predicción etc. (Bernabé & Vega, 2010, pág. 1311)

**Estimación de variables cuantitativas:** Dentro de esta etapa es fundamental que los tonelajes, distribución de leyes y otras variables de importancia en el yacimiento sean representadas en un modelo. Entonces, con el empleo de herramientas estadísticas y aplicación de operaciones matemáticas se puede lograr analizar integralmente los datos, para obtener resultados sin sesgo. A fin de llevar a cabo este proceso, se realiza la regularización de las muestras, junto con la composición, donde se ponderan todas las muestras.

**Unidades de Estimación (UE):** Representan a los dominios con singularidades internas, pero con diferentes características exteriores (alrededor). Establecer unidades de estimación contribuye en la separación de datos para estimar variables en diferentes sectores de espacio. Para lograr determinar las unidades de estimación, se aplican ciertas herramientas como diagramas QQ (calidad), leyes promedio, gráficos de cajas, variografía, etc. (Hernández, Barboza, & Alberdi, 2022)

**Plan de Estimación de Recursos:** Según Herrera (2018, pág. 23) el plan de estimación de recursos consiste en determinar la forma para recolectar las muestras, con el fin de estructurar bloques que estimen los recursos existentes, para lo cual se ejecutan estrategias para seleccionar muestras y la cantidad que se recolectará, determinar las direcciones de anisotropía, limitar las unidades y consideraciones geológicas, etc. En algunos casos, se utilizan estrategias que no están orientadas a la geología, las cuales generan resultados con sesgo. Por lo expuesto, las metodologías empleadas que si están relacionadas con la geología son: Estimación global y local, polígonos de influencia, Kriging simple-ordinario-de bloques, etc.

**Validación de Estimación:** Verificar los criterios, junto con, los resultados de la estimación de tonelaje y ley, son procesos inmersos en esta etapa. Dentro de esta etapa se valida el modelo planteado, proponiendo aspectos de mejora en una zona o de manera sistemática, con el fin de maximizar la precisión de estimación. Las herramientas empleadas, son la validación cruzada, evaluación de predictibilidad, revisión de errores, etc. (Bernabé & Vega, 2010, pág. 1312)

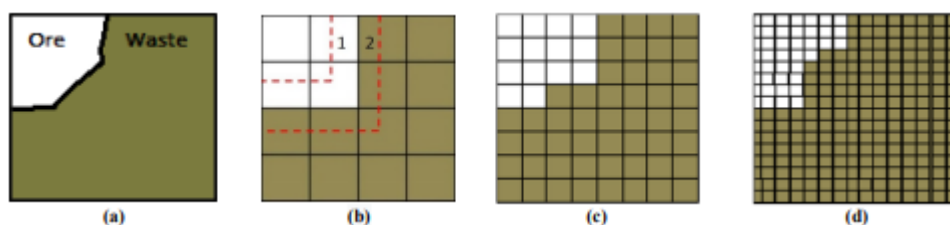
**Clasificación de recursos:** Se debe otorgar a los recursos una categorización en función al nivel de confianza que se obtuvo en la precisión de leyes y tonelajes estimados, considerando el control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) en los aspectos geológicos, análisis químicos, etc. de los resultados. Existen algunos criterios para clasificar recursos: Varianza de Kriging, probabilidad de error y volumen, incertidumbre de leyes y tonelajes, etc. (Joint Ore Reserves Committee, 2012)

**Clasificación de recursos minerales:** La clasificación de recursos lo dictamina el Código del Comité Conjunto de Australasia para Reservas de Mena (Código JORC), que clasifican los recursos según el nivel de conocimiento geológico y confianza. Estos

pueden ser: Recurso mineral medido (1), indicado (0.75) e inferido. Para reservas también existe una clasificación en, reserva de mena probada y probable (Canadian Securities Administrators, 2020).

**Grado de Ley de Corte:** (Khorram F., Asghari, O., Memarian, H., Morshedy, A., & Emery, X. 2021) sostiene que el grado de corte tiene una relación inversamente proporcional con la continuidad del mineral, pues si este grado de corte se incrementa, la continuidad y los volúmenes a explotar disminuyen en tonelaje. En la Figura 27 se presenta el efecto del tamaño en el bloque.

**Figura 27** Efecto del tamaño de bloque en la separación del mineral y residuos



*Nota.* Tomado de “Adaptive Multi-Size Block Modeling for Mineral Resources and Ore Reserves Evaluation”, presentado en Journal of Mining and Environment (JME) por Khorram et al., 2014, p. 148.

**Validación del modelo:** Herrera y Mayorga (2020) detallan que en esta etapa final se realiza una comparación de los resultados estimados antes de la explotación con los resultados reales obtenidos luego de comenzar las operaciones en mina. A partir de esta contrastación se pueden detallar puntos de mejora para posteriores estimaciones en diferentes zonas. Para este proceso se toman ciertas consideraciones, unidad básica de conciliación, método de explotación, calidad de información etc. También, se emplean herramientas como curvas de tonelaje de ley, diagrama de dispersión de leyes de corte y error relativo.

**Ratio:** Real Academia Española (2023) define al ratio como: “Razón o relación entre dos cantidades o magnitudes”. Otro concepto en el ámbito minero, delimita el

significado de ratio como un elemento de planificación técnica y no una herramienta de carácter económico. Al mostrarse la relación E/M, donde E representa la cantidad del estéril a mover necesario para descubrir y donde M representa M toneladas de mineral poder arrancar (Herrera, 2006).

El concepto de ratio puede variar según el punto de vista en el cual se le utiliza:

- Ratio inicial: Toneladas descubiertas al iniciar el proyecto minero, donde un desmonte mínimo necesario para descubrir las toneladas iniciales y mantener el ritmo anual.
- Ratio anual: Desmonte preciso o programado para un período de un año, que tiene por objetivo preservar el ritmo de extracción en los años posteriores.
- Ratio final: Comprende todo el período fijado para la vida del proyecto considerado.

**Cobre:** Para el desarrollo de la humanidad, el cobre ha sido un recurso natural primordial pues sus aplicaciones han contribuido ampliamente en varios campos. Gracias a que posee propiedades físicas y químicas únicas, que incluyen conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a la corrosión, maquinabilidad y moldeabilidad, el cobre se ha vuelto un material esencial de alto rendimiento que tienen una gran gama de aplicación en la vida diaria e incluso coadyuva con el crecimiento económico sostenible de diversos países (International Copper Association, 2023, pág. 8).

### ***Propiedades***

El cobre es considerado un compuesto químico del tipo metal no alótropo, en sus caras tiene estructura cúbica centrada (FCC). Se le conoce como “metal rojo” debido a su color característico, otra singularidad es que cuando se combina el cobre con otros compuestos pueden obtener otros colores. Tiene una densidad de 8.96 g/cm<sup>3</sup>,

al convertir en unidades del sistema internacional, se obtiene 8900 kg/m<sup>3</sup>. La temperatura de fusión representativa de este metal es de 1083 °C, su temperatura de ebullición es de 2595 °C. Las otras propiedades como conductividad eléctrica y térmica se encuentran en rangos aceptables pues cumplen su función correctamente (Crespo, 2021, págs. 13-14).

### ***Características representativas del cobre***

**Alta resistencia a la corrosión:** Crespo (2021) señala que la singularidad de resistencia del cobre ante la corrosión, se debe a que al unirse con otros metales forma películas impermeables que se adhieren sobre la superficie del material, brindándole protección ante ataques, ya sean soluciones salinas, suelos, minerales no oxidantes, ácidos orgánicos y soluciones causticas. A pesar, de la estabilidad química innata del cobre y sus aleaciones, existen compuestos como, el amoníaco húmedo, halógenos, sulfuros, soluciones que contienen iones amoniacos y ácido nítrico, los cuales atacan al cobre (pág. 16).

En relación a lo expuesto, hasta la actualidad se busca nuevas aleaciones o métodos que eviten la corrosión del cobre ante entes amoniacales u oxidativos.

**Excelsa conductividad eléctrica y térmica:** Norma Internacional de Cobre Recocido – IACS establece que el cobre “puro” tiene un valor de conductividad eléctrica de 100%, este valor a su vez disminuye en relación a las aleaciones con otros metales a los que se somete al cobre. Por otra parte, las aleaciones con conductividades más altas tienen una relación inversamente proporcional con la resistencia. Las aleaciones de cobre con 85% IACS son las idóneas para utilizar en interconexiones y transmisiones eléctricas (Jagannadham, 2011).

Existe una relación directamente proporcional entre la conductividad térmica y eléctrica, y el valor de estos parámetros varían según sean los compuestos con los que

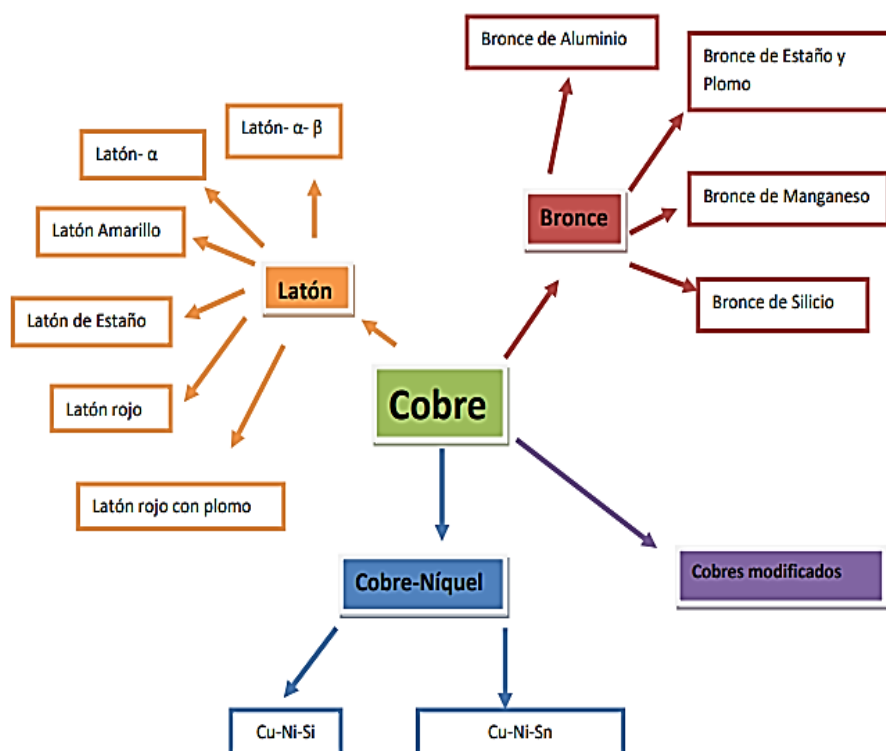
se ha unido al cobre. La resistividad eléctrica de una aleación se relaciona directamente con el malgasto mayor de energía, es decir, la resistencia es proporcional al calor generado (potencia) por una corriente eléctrica. La potencia generada se debe a un incremento de temperatura del material, lo cual puede provocar fallos, es así que al crear aleaciones de diversos compuestos químicos con el cobre, se puede minimizar un aumento de temperatura, por lo tanto, una parte del calor es disipado (Jagannadham, 2011).

**Capacidad de unión:** El cobre tiene una capacidad de unión, razón de ello, son las diversas aleaciones que existen de cobre y otros elementos químicos. Dentro de las aleaciones de cobre existen tres grupos, se da esta clasificación en función al químico con el cual se une el cobre:

- Cobre modificados (cobre-níquel, cobre-plata, etc.)
- Latones (cobre-zinc + otro elemento)
- Bronces (cobre + otros elementos excepto zinc)

Dentro de la Figura 28 se presentan las aleaciones de cobre:

**Figura 28** Aleaciones de cobre



*Nota.* Tomado de “Aleaciones de cobre: Desarrollos recientes y nuevas perspectivas”, presentado en Universidad Politécnica de Cartagena; Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial por Javier Crespo, 2021.

**Maleabilidad, resistencia y conformabilidad:** Ser maleable y blando son características conocidas del cobre. También, puede adaptarse a la forma y dimensión que se desee, por lo tanto, posee la propiedad de la conformabilidad. La aleación de cobre genera algún tipo de fluctuación en su valor de resistencia, que depende de la cantidad y naturales del componente químico con el cual se une al cobre (Aalco Metals Ltd, 2018).

**Aplicaciones:** Las aplicaciones del cobre son de repertorio abierto, puesto que este metal tiene diversas propiedades fisicoquímicas. International Copper Association (2023) divide las aplicaciones del metal rojo, cobre, en 4 rubros los cuales se subdividen en premisas aplicativas:

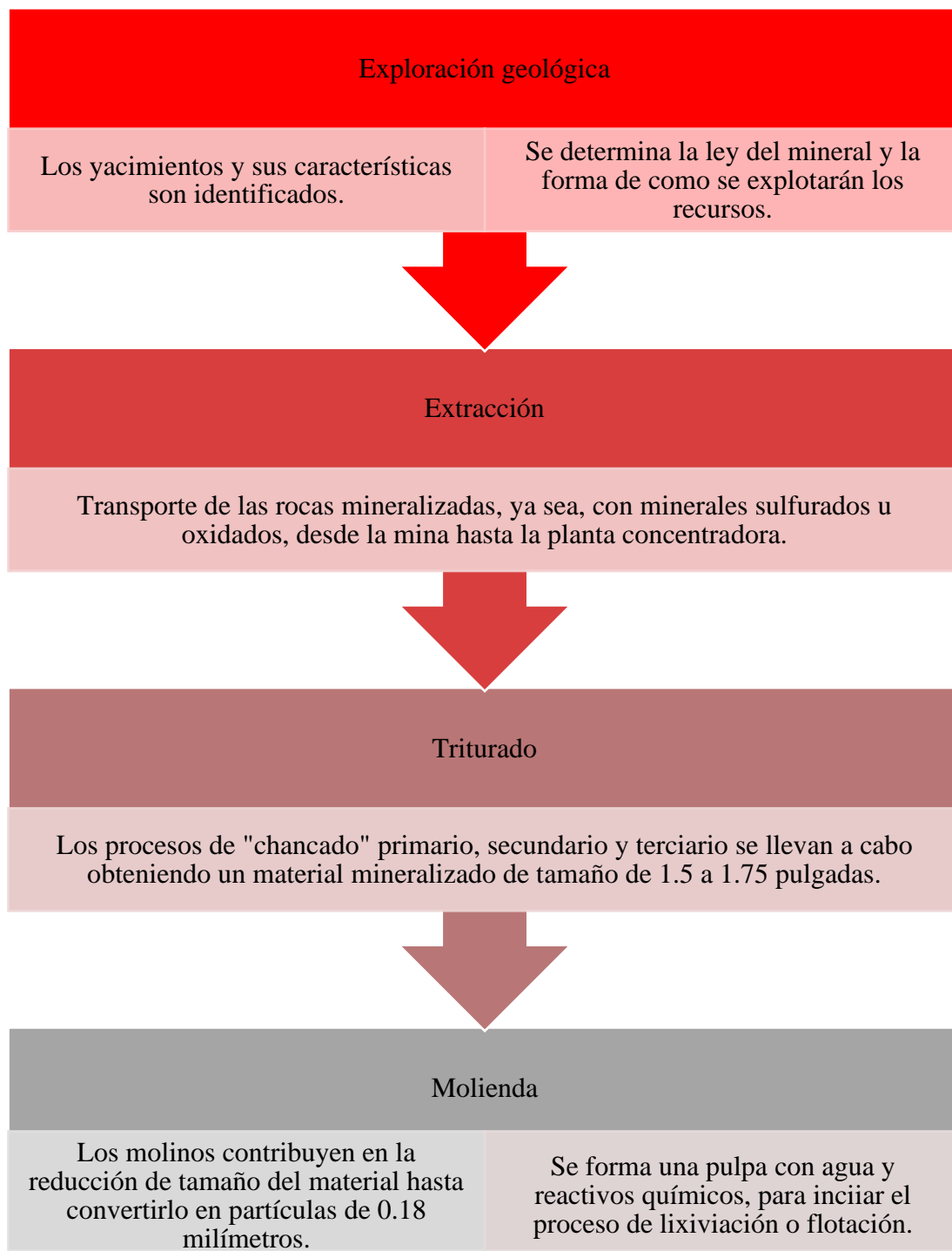
- **Construcción e industria:** Dentro de este rubro, el cobre se utiliza en: Instalaciones eléctricas, electrodomésticos, calefacción solar, calefacción, motores, aire acondicionado, agua y gas.
- **Sistema eléctrico:** Generación renovable, sistemas de transmisión y distribución, almacenamiento de la red, cable submarino y subterráneo son las aplicaciones del cobre y sus aleaciones en este sector.
- **Transporte:** Uno de los rubros más utilizados presenta empleo del cobre en: Ferrocarril (catenaria), arnés automotriz, baterías automotrices y motores eléctricos para autos.
- **Misceláneos:** Este último sector presenta los usos menos conocidos del cobre y sus aleaciones, entre estos usos tenemos: Telecomunicaciones, aparatos electrónicos, aplicaciones marinas, arquitectura, diseño de interiores, acuicultura, ganadería y agricultura.

#### ***Proceso metalúrgico del cobre:***

La extracción del cobre del yacimiento, aglomera diversas etapas para convertirse en un recurso listo para comercializar, especialmente porque los minerales que contienen este elemento químico están combinados con otros compuestos, donde los enlaces difíciles de romper. Debido a esto se clasifican los procesos metalúrgicos, de acuerdo a la composición química en minerales sulfurados (alto contenido de azufre – S) y minerales oxidados (elevada composición de óxido de carbono – CO). De esta como, comienza el proceso partiendo por la extracción del mineral desde la mina de diversa tipología, luego pasa por un proceso de triturado o chancado, en el cual se disminuye el tamaño, para posteriormente pasar al proceso de molienda, donde se muelen las piedras pequeñas provenientes de la trituración hasta convertirlas en tamaño diminuto. Desde este punto, se ramifica el tratamiento un específico para minerales

sulfurados y otro para minerales oxidados (Donoso Muñoz, 2013). Dentro de la Figura 29 se presenta el proceso productivo metalúrgico para el cobre.

**Figura 29** *Proceso productivo común para minerales oxidados y sulfurados*



*Nota.* Tomado de “El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras”, presentado en Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 2, Manuel Donoso, 2013.

### ***Proceso para minerales oxidados***

Continúa con un proceso de lixiviación, también llamado, proceso hidrometalúrgico, donde se utiliza una solución acuosa como ácido sulfúrico y agua, con el fin de disolver el cobre contenido en el mineral, produciendo soluciones de sulfato de cobre. Consecuentemente, se lleva a cabo el proceso de extracción con solventes químicos (Sx) para separar el sulfato de cobre de las impurezas, obteniendo un concentrado de cobre. Finalmente, para purificar el concentrado obtenido se realiza el proceso electrometalúrgico (Ew), en el cual se utiliza una solución acuosa y corriente eléctrica, presentadas en celdas electrolíticas, donde el resultado final se encuentra en los cátodos de cobre SxEw con 99.99% de pureza (Crespo, 2021, pág. 11). La Figura 30 representa el proceso productivo para minerales oxidados.

**Figura 30** *Proceso productivo minerales oxidados*



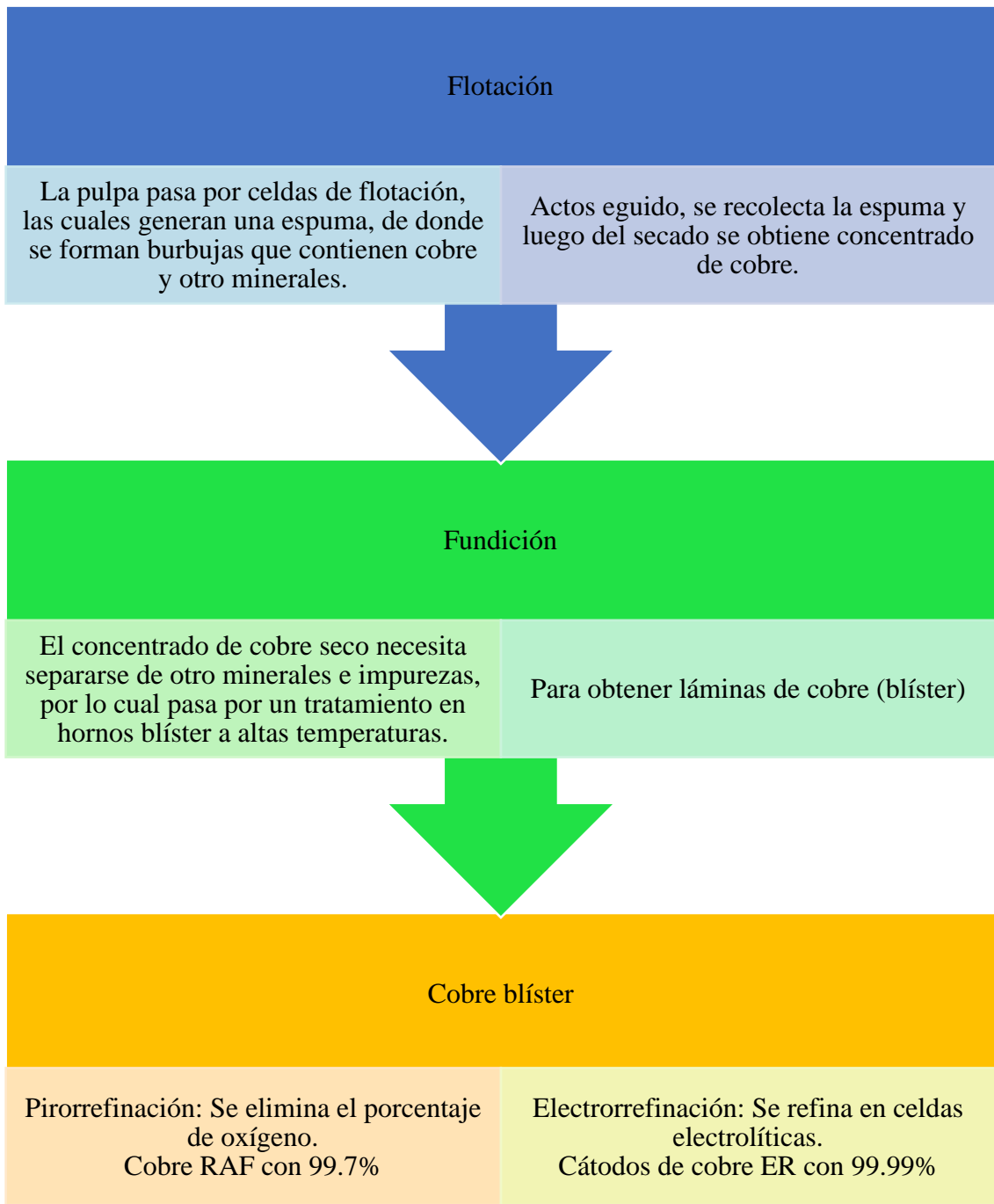
*Nota.* Tomado de “El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras”, presentado en Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 2, Manuel Donoso, 2013.

### ***Proceso para minerales sulfurados***

Luego de la molienda, viene el proceso de clasificación, pues solo pueden pasar a la siguiente etapa los minerales que poseen el tamaño adecuado. Luego vienen el proceso de concentrado, que se subdivide en flotación y secado. En floculación, se separa el cobre contenido en el mineral de la parte que no lo tiene mediante una solución acuosa. Para el secado, primero se decanta el cobre contenido en la solución acuosa, posteriormente se lleva el cobre que fue separado a una temperatura alta, para que se seque, obteniendo cobre al 30%. Como la purificación es necesaria, se lleva este cobre en hornos de refino blíster, donde se obtienen láminas de cobre al 96%, el cual puede ser ya comercializado.

Un camino para purificar más el cobre obtenido, consiste en aplicar el llamado refinado a fuego para obtener cobre RAF al 99.7%. Otro camino es aplicar moldeo de ánodos, para que luego de la fundición, se lleve a cabo la electro-refinación, donde utilizan celdas electrolíticas para purificar las placas y en el cátodo se obtiene cobre ER al 99.99% de pureza (Crespo, 2021, pág. 11). La Figura 31 representa el proceso productivo para minerales sulfurados.

**Figura 31** *Proceso productivo minerales sulfurados*



*Nota.* Tomado de “El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras”, presentado en Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 2, Manuel Donoso, 2013.

**Arsénico:** Elemento químico con símbolo As, número atómico de valor 33, posee un peso atómico de 74, 922 g/mol. Posee características específicas de un metaloide, que hacen que su comportamiento sea en algunas ocasiones como un metal y en otras como un no metal. Debido a su versatilidad estructural, el arsénico posee varios alótropos, tales como: Gris (estructura cristalina), amarilla (moléculas tetraédricas) y negra (se asemeja a la estructura del fósforo rojo) (Gasque, 2013). En la Figura 32 se aprecia las formas alotrópicas del arsénico.

**Figura 32** Formas alotrópicas del arsénico



*Nota.* Tomado de “Arsénico, el elemento inclasificable” de presentado en Educación química 24(2) por Gasque, 2013.

Martínez-López et al. (2021) sostiene que el arsénico se encuentra en un porcentaje muy bajo en toda la corteza terrestre ( $5 \times 10^{-4}$  %), naturalmente se puede ubicar en minerales con azufre o cobalto, el mineral que contiene arsénico, más conocido es la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) (p. 257).

**Aplicaciones:** Las aplicaciones del arsénico pueden ser mediante aleaciones, por ejemplo, el arseniuro de galio ( $\text{GaAs}$ ) en estado sólido se utiliza como agente acelerador en la manufactura de varios aparatos, como celdas solares. El óxido de arsénico es empelado en la industria de elaboración de vidrio. Para el área pirotécnica de juegos y pigmentos se emplean sulfuros de arsénico. Por último, arsénico puede ser utilizado en la medicina, tomando como ejemplo  $\text{As}_2\text{O}_3$  para brindar tratamiento para

la leucemia promielocítica aguda (LPA) logrando índices de curación superiores al 90% (Gasque, 2013).

### ***Lixiviación de concentrados de cobre con alto contenido de arsénico***

Herreros et al. (2003) plantea una experiencias de lixiviación de concentrados de cobre con un alto nivel de arsénico en su composición, mediante un proceso de oxidación con cloro, para que el ácido sulfúrico reaccione con el hipoclorito de sodio, donde el producto sea una solución que cumplan con los parámetros específicos ( 4 a 6 g/L de cobre y 5 a 7 g/L de ácido residual) y pueda ingresar a la etapa de extracción de solventes (SX), es correcto evaluar los componentes del mineral luego del proceso metalúrgico (lixiviación) a través de la espectroscopía de absorción atómica (págs. 8-9).

Bruce et al. (2011, págs. 3-12) mencionan que el proceso CESL, consta de 5 pasos para su realización: Oxidación a presión, decantación de corriente, extracción de solvente, electro-obtención y neutralización. De esta manera, empearon este método en la metalurgia de los minerales enargita y la tennantita, los cuales poseen en su composición entre 0,7% y 4,6% de arsénico. Luego, de haber realizado todas las etapas del proceso, se logró extraer hasta 97% de cobre, a partir de concentrados de 4.8 toneladas en una planta piloto de cobre totalmente integrada, que operaba 35 kilogramos de cobre en el cátodo por un día completo.

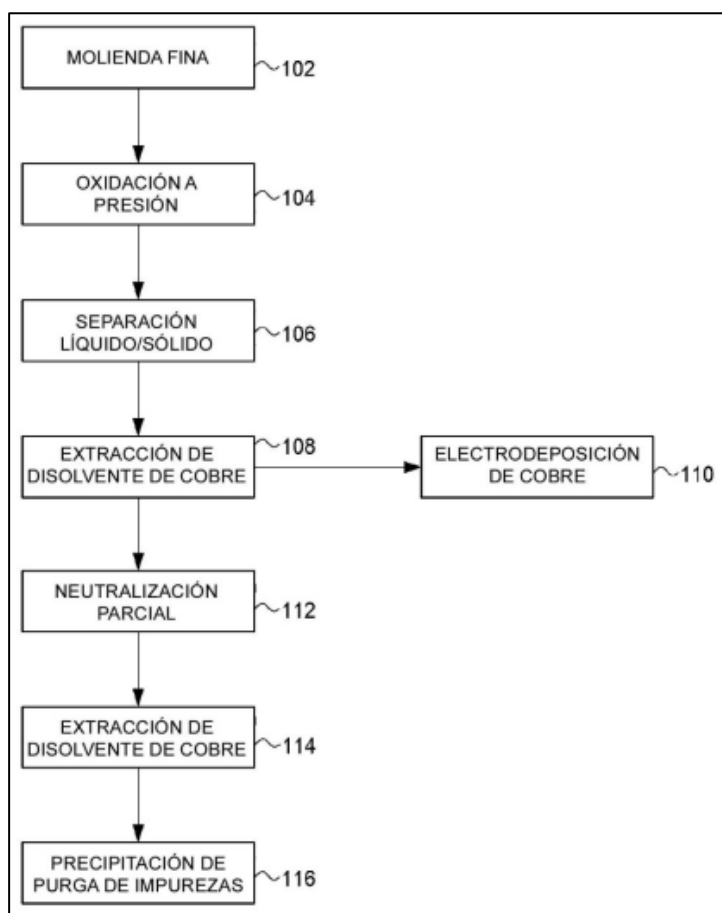
La vanguardia del desarrollo de nuevas técnicas para mejorar los procesos metalúrgicos, conlleva a la invención de extraer cobre a partir de un mineral que posee 1.2 a 16.1% de arsénico. Primero, se debe reducir el tamaño del mineral en molienda de 15 a 5 micrómetros aproximadamente. Luego, se somete al mineral a un proceso de oxidación a presión donde participa un tensioactivo: sulfonato de lignina, quebracho, anilina y o-fenilendiamina, los primeros tres compuestos de 1 a 10 kg/t, el último

compuesto, solo se usa la cantidad de 1.5 a 3 kg/t. Este proceso necesita, un halógeno, por ejemplo, cloruro o bromuro, a una concentración de 3 a 20 g/l aproximadamente. El propósito de este proceso es oxidar los minerales que contienen sulfuro, para obtener una suspensión del producto, la solución expulsa cobre y el arsénico se disuelve, para luego ser precipitado en un matraz de óxido de hierro.

La suspensión del producto, se verte en la autoclave, para modificar la presión atmosférica (despresurizar) y enfriar. Acto seguido, se lleva a otra separación de líquido/sólido, donde se obtiene un licor de lixiviación de cobre; por otro lado, el residuo es rico en hierro, arsénico y antimonio. El proceso siguiente consiste en extraer con disolvente al cobre, con el principio de intercambiar ácido por cobre en la sección de filtrado. El refinado en estado acuoso obtenido, se recircula al proceso de oxidación a presión. Dependiendo de la cantidad de azufre, que constituye el mineral, este se convierte en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) dentro del autoclave, puede existir un exceso de flujo, por lo cual se procede a la fase de neutralización con piedra caliza para producir el yeso.

En todo el proceso existe cantidades de impurezas que se van arrastrando en cada etapa, razón por la cual, se procede a conducir el refinado neutralizado al proceso de extracción de disolvente secundario, del cual se puede extraer cobre (muy pobre) de la fase orgánica del proceso, para iniciar su recirculación a la fase de extracción de disolvente cúprico, el cobre recuperado en esa fase, se electro-deposita en celdas y se recupera el metal cobre. Finalmente, la corriente que no tiene cobre se precipita con cal, para purgar las impurezas. El producto en solución de esta etapa, se puede reutilizar para lavar los residuos de hierro de la fase separación/líquido (De Friedberg, Hee Mun, & Hee Mun, 2020). En la Figura 33 se muestra el proceso de lixiviación de cobre con alto contenido de arsénico.

**Figura 33** *Proceso de lixiviación de cobre con alto contenido de arsénico*



*Nota.* Tomado de “Proceso para la recuperación de cobre a partir de concentrados de sulfuro de presentado en por De Friedberg et al., 2020.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Arsénico:** Elemento químico con símbolo As, número atómico de valor 33, posee un peso atómico de 74, 922 g/mol. El arsénico, se comporta en ciertas ocasiones como un metal típico y en otras como un típico no metal (Gasque, 2013).

**Categorización del recurso:** Consiste en el nivel de información que se obtiene de un recurso minero, en tres dimensiones mediante la concentración de datos de muestreos superficiales, sondeos y/o labores mineras (Empresa Nacional Minera del Ecuador - ENAMI, 2018).

**Cobre:** Elemento químico con el símbolo, Cu. Su número atómico es 29; de peso atómico, 63.546 UMA. Es un metal de transición de color rojizo y brillo metálico, su singularidad principal consiste en que es uno de los mejores conductores de electricidad (Codelco, 2018).

**Estimación de recursos:** Determinación de la cantidad de materia prima contenida en un depósito mineral o en una zona dentro del yacimiento (Empresa Nacional Minera del Ecuador - ENAMI, 2018).

**Geoestadística:** Técnicas que usan la ciencia de la estadística que estudia variables numéricas distribuidas en un área (espacio). Su función es explicar las variaciones del espacio, estimar y generar un rango de influencia en el fenómeno del espacio estudiado (Garnier-Villareal, 2022).

**Ley de corte:** Hace referencia a la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído produciendo un beneficio económico (Codelco, 2018).

**Ley de mena:** Consiste en el contenido de un determinado metal en la mena, expresado en porcentaje (%), en ppm (partes por millón) o en gramos por tonelada (g/t) (Codelco, 2018).

**Ley de mineral:** Evalúa la concentración de oro, plata, cobre, estaño, etc., presente en las rocas y en el material mineralizado de un yacimiento (Codelco, 2018).

**Modelación geológica:** Conjunto de procesos de donde se estructura una representación matemática tridimensional del depósito y de la topografía en un área determinada (Empresa Nacional Minera del Ecuador - ENAMI, 2018).

**Ratio:** Razón o relación entre dos cantidades o magnitudes (Real Academia Española, 2024).

**Recurso minero:** Material natural de características singulares que existe en una concentración apreciable, que genera un interés de potencial técnico-económico.

Se clasifican en: recursos medidos, indicados e inferidos (Empresa Nacional Minera del Ecuador - ENAMI, 2018).

**Reserva minera:** Porción de terreno donde se pueden encontrar, recursos medidos, indicados, etc. los cuales presentan características de interés para ser extraídas acorde a un plan minero (Empresa Nacional Minera del Ecuador - ENAMI, 2018).

**Semivariograma:** Representación gráfica donde se registran los datos de la varianza y el vector de módulo igual al intervalo de muestreo (González, Guerra, & Gómez, 2007).

**SMU (Unidades selectas de minería):** Volumen de roca de cantidades insustanciales, es decir mínimas, se utiliza este término en geología para referirse al material que, en la fase de exploración minera, se encuentra fuera del acceso de la red de muestreo previamente planteada (Poniewierski, 2019).

**Soporte de soporte:** Volumen de donde se extraen valores para calcular, ponderar, etc. (Poniewierski, 2019)

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Al utilizar el ratio Cu/As en el modelamiento de recursos minerales, se mejora la precisión de la estimación y la planificación minera en la Sociedad Minera El Brocal durante el año 2024.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas**

- a. El análisis de los datos geológicos contribuye de manera significativa al modelamiento y estimación de recursos en función del ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal.

- b. La aplicación de técnicas geoestadísticas permite delimitar adecuadamente las unidades geológicas necesarias para mejorar la estimación de recursos basada en el ratio Cu/As.
- c. La definición de los parámetros del modelo de bloques mejora la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal.
- d. El cálculo de la varianza de Kriging y del variograma aporta mejoras significativas en la estimación de recursos utilizando el ratio Cu/As.
- e. La clasificación de los recursos minerales en función del ratio Cu/As cumple con los criterios de confiabilidad establecidos por el informe JORC.
- f. La validación del modelo de bloques y de la estimación de recursos basada en el ratio Cu/As evidencia mejoras significativas respecto a los datos reales observados.

## **2.5. Identificación de variables**

**Variable 1:** Modelamiento de recursos minerales

**Variable 2:** Estimación de recursos minerales

## **2.6. Definición operacional de variables e indicadores**

En la (Maldonado & Mayorga, 2022) se muestra la operacionalización de variable.

**Tabla 1** Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escales		
<b>Modelamiento de recursos minerales</b>	Tómas-Antonio et al. (2020) detalla que un modelo geológico es el estudio del comportamiento y las singularidades de un yacimiento, que es representado en modelos tridimensionales, en base a un análisis del espacio y tiempo de ciertas variables geológicas.	Para medir esta variable se utilizará una ficha de observación y recolección de datos, en la cual se analizarán las dimensiones geológicas, de modelado y parámetros.	Análisis exploratorio y geológico de datos y geología	Litología: Grupos litoestructurales, microestructura de las rocas y estructura de masa de rocas	Grupo litoestructurales:	Roca fuerte masiva, roca fuerte discontinua, roca compuesta, roca debilitada tectónicamente, roca débil granular, roca kárstica, roca anisotrópica y roca con apariencia de suelo	
					Microestructura de las rocas	Minerales	Feldespatos y cuarzos
						Partículas constituyentes	Bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas
						Textura	Cristalina, hipocristalina, hidralina y clásica
						Fábrica	Desordenada, paralela y fibrosa.
					Estructura de masa de rocas	Estratificación	Contactos de depositación de materiales
Discontinuidades	Paralelas a la estratificación y paralelas a la esquistocidad						

---

Pliegues	Plegamientos de la esquistocidad o estratificación
Fallas	Falla hacia abajo, hacia arriba, longitudinal y de rotación
Continuidad	Definir la magnitud de posibles fallas
Espaciamiento	Espaciamiento extremo ancho, muy ancho, ancho, medio, cercano, muy cercano y extremadamente cercano.
Resistencia al corte	Resistencia alta (Discontinuidades naturalmente cerradas) Resistencia baja (Discontinuidades abiertas)

---

	Variables geológicas: Tipo de depósito e intersecciones	Tipo de depósito	Depósito de costura, de vetas de metales preciosos y pórfido Cu/Au/Mo
		Intersecciones	Intersecciones de los pozos mediante puntos
Metodología de modelización de dominios	- Dominios geológicos: Límites geológicos	Límites geológicos	Zona de fallas, zonas de menas degradadas y zonas de residuos internos
	- Estadística de datos: Histograma de distribuciones de cobre y arsénico	Histograma	Distribución de datos de cobre. Distribución de datos de arsénico. Diagrama mixto.
Parámetros del modelo de bloque	- Soporte de bloque: Volumen	Volumen	Delimitar el alto, ancho y largo del bloque
	- Ubicación: Coordenadas específicas	Coordenadas	Establecer las coordenadas de norte, sur, este y oeste de la zona.
	- Análisis estadístico: Variograma y continuidad	Variograma	Kriging Universal
	- Leyes interpoladas: Kriging ordinario	Continuidad	Parámetros del variograma o indicadores de Kriging
		Kriging ordinario	Matrices interpoladas

			- Densidad de roca: Densidad aparente	Densidad aparente	Calcular las reservas del mineral
<b>Estimación de recursos minerales</b>	Este proceso tiene la finalidad de estructurar un modelo para predecir la cantidad, calidad y distribución del material de la zona a estudiar, esta etapa se lleva en la fase de exploración minera. En todo momento se deben desempeñar actividades de revisión, validación y documentación, para cumplir con todas las etapas de manera correcta y según sea el caso practicar la mejora continua	Metodología de interpolación	- Varianza de Kriging: Grado de confianza	Varianza de Kriging	Representa el grado de confianza de los recursos
			- Alcance de variograma: Análisis del variograma	Análisis del variograma	Distancia a la cual el variograma se estabiliza y las muestras se relacionan espacialmente
		Clasificación de recursos minerales	-	Informe JORC	Recursos mineral medido, indicado e inferido
			- Cutt-off: Grado de corte de Cu	Ley de corte	Grado mínimo requerido para que un mineral o metal sea extraído económicamente
		Validación de modelado de recursos minerales	- Tonelaje real y tonelaje estimado	Tonelaje estimado	Estimación de toneladas de cobre y arsénico existentes
			- Diagrama de dispersión: Leyes de corte de Cu y As	Tonelaje real	Cantidad de toneladas que ya son explotadas de la zona en relación al cobre y arsénico
				Ley de cobre	Cantidad de cobre contenido en el yacimiento
			- Ratio: Relación de cobre y	Ley de arsénico	Cantidad de arsénico contenido en el yacimiento
		Ratio Cu/As	Relación de los tonelajes estimados de cobre en relación a los tonelajes de arsénico		

---

(Sulistiyana &  
Ali Amri, 2016).

---

arsénico  
existente

---

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de la investigación**

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como finalidad resolver un problema específico dentro del contexto minero nacional: la estimación precisa de recursos minerales en función del ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal. La investigación aplicada se caracteriza por emplear conocimientos científicos para dar solución a situaciones concretas, contribuyendo directamente a la toma de decisiones técnicas y estratégicas en el ámbito de la planificación minera.

Asimismo, el nivel de investigación es descriptivo, pues se centra en caracterizar las variables geológicas, geoquímicas y geoestadísticas del yacimiento en estudio. A través de la recolección, sistematización y análisis de datos, se busca representar con precisión las condiciones actuales del depósito, así como establecer los parámetros clave para el modelamiento y la estimación de recursos minerales.

El enfoque metodológico es cuantitativo, ya que se basa en la medición objetiva de variables, el análisis estadístico de datos recolectados y la aplicación de métodos matemáticos y geoestadísticos como la interpolación Kriging. Este enfoque permite

estructurar los datos de manera rigurosa y replicable, garantizando resultados verificables que sustentan técnicamente el modelo de bloques propuesto.

### **3.2. Nivel de investigación**

La investigación será de tipo aplicada, pues según la cosmovisión científica de Ñaupas et al. (2018) el propósito de la investigación aplicada consiste en resolver problemas de escala local, regional y nacional basándose en los resultados preestablecidos de una investigación básica. Es así como, siguiendo este concepto, se plantea optar por la propuesta de modelo de bloques de Duke y Hanna (2014) y Poniewierski (2019), junto con los procesos de estimación planteados por Sulistyana y Ali Amri (2016) para lograr plantear un modelamiento idóneo y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal.

La presente tesis será de nivel descriptivo, debido al hecho que, acorde con Ñaupas et al. (2018) este tipo de nivel investigativo tiene como pilar la recolección de información sobre ciertas características, dimensiones etc. de procesos naturales o sociales u otros entes. Por lo expuesto, en la presente investigación se utilizará los métodos descritos por Maldonado y Mayorga (2022), con el fin de establecer los parámetros para el modelamiento, a la vez, clasificar los resultados dentro de la estimación de recursos minerales.

La investigación será de enfoque cuantitativo, basándose en lo presentado por Ñaupas et al. (2018), pues este enfoque emplea la recolección y análisis de datos para connotar una respuesta a la investigación, mediante el uso de estadística descriptiva e inferencial. Por esta razón, la investigación será cuantitativa pues se plantea recolectar datos del yacimiento para analizarlos con estadísticas y otros métodos matemáticos, con el fin de determinar parámetros para la estimación correcta de recursos.

### **3.3. Métodos de investigación**

#### **3.3.1. Método general**

Se empleará el método científico en base a lo establecido por Ñaupas et al. (2018), la definición de método científico consiste en un proceso estructurado en orden, que genera conocimiento científico de la realidad y verifica lo que se ha connotado, mediante la identificación de un problema, revisión de la literatura, planteamiento de una posible respuesta a un fenómeno, recolección de información para contrastar la verificación y, por último, estructurar conclusiones del conocimiento científico provisional adoptado. Para la investigación, Maldonado y Mayorga (2022) plantean metodologías donde se aplica el conocimiento científico para modelar y estimar recursos en pórfidos cupríferos del sur del Perú. En primer lugar, se identifica la relevancia de modelar y estimar recursos en la Sociedad Minera el Brocal, luego con la revisión de estimaciones anteriores en la mina; por consiguiente, se estructura una respuesta de la manera en cómo se modelaría y estimaría recursos minerales en relación al ratio de Cu/As; posteriormente, se recolectan datos de variables geológicas para determinar el soporte de los bloques, etc. Finalmente, se logra categorizar los recursos estimados y calcular la ley de corte, con el fin de concluir que el proyecto es viable o no.

#### **3.3.2. Métodos específicos**

En la investigación se empleará el método de la modelación, el cual según Ñaupas et al. (2018) estipulan que la modelación permite estructurar de manera natural o artificial el objeto en estudio para detallar las singularidades extraídas del mismo. De esta manera, para modelar los recursos minerales existentes en Sociedad Minera el Brocal se debe plantear los límites y unidades del modelo, luego, se seleccionará el método de estimación de ley adecuado, consecuentemente, se analizará

estadísticamente los datos, se construirán bloques de diferente tamaño y soporte, para llenar toda la zona en análisis, por último, se verificará el modelado planteado.

También, se empleará el método de simulación, ya que acorde con Herrera (2013) la simulación pone a prueba modelos para validarlos, corregirlos y eliminarlos según sea el caso, ya que la tecnología está en vanguardia, se han creado programas que analizan todos los parámetros del modelo planteado. En relación a lo mencionado, dentro de la investigación se plantea simular en el programa Leapfrog con el fin de realizar una validación correcta del modelo con sus controles y dominios geológicos, así como lo plantean Bernabé y Vega (2010).

Además, aplicar el método de medición en la investigación será crucial. Puesto que, el método de medición debe cumplir con tres requisitos esenciales para cumplir con su propósito de recolección de datos, según Hernández (2014) estos requisitos son la confiabilidad, validez y objetividad. Para la investigación será importante emplear este método pues analizará los datos (EDA) los cuales deben verificarse, con el fin de garantizar su veracidad.

### **3.4. Diseño de investigación**

La investigación será de diseño no experimental, ya que Ñahupas et al. (2018) plantean que la investigación no experimental descriptiva simple es la que en ningún momento manipula a las variables, pues solo observa los fenómenos para posteriormente analizarlos, la transversalidad asociada a esta investigación describe que solo se recolectan datos en un tiempo único, para determinar y analizar las variables en cuestión.

Para la investigación se plantea, fases para realizar esta investigación:

- **Análisis exploratorio y geológico de datos y geología:** Se realizará en el trabajo de campo donde se observará y recopilará los datos extraídos de la Sociedad Minera

el Brocal solo por un tiempo, en relación a la litología (Grupos litoestructurales, microestructura de las rocas y estructura de masa de rocas) y variables geológicas (tipo de depósito e intersecciones).

- Metodología de modelización de dominios: Se determinará los dominios geológicos (Zona de fallas, zonas de menas degradadas y zonas de residuos internos) para caracterizar la zona. También se aplicará la estadística para graficar los diagramas de datos del cobre y arsénico, con el fin de determinar que distribución poseen.
- Determinación de parámetros del bloque: Se delimitará el soporte (volumen a analizar) y se establecer la ubicación de los bloques con unas dimensiones respectivas. Se empleará las metodologías de estimación como Kriging universal, para estructurar el variograma y determinar la continuidad de la zona estudiada. Luego se interpolará las leyes con matrices mediante el proceso de Kriging ordinario, para que finalmente se pueda calcular la densidad aparente de las reservas de mineral.
- Metodología de interpolación: Se calculará la varianza de Kriging el cual representará el grado de confiabilidad de los recursos, entonces al analizar el variograma se relacionan las muestras.
- Clasificación de recursos minerales: En relación a la categorización de los recursos se realizará según lo dictaminado en el informe JORC, de esta manera, se comparará los resultados con la ley de corte.

Validación de modelado de recursos minerales: Se validará el modelo al emplear el software Leapfrog para validar el modelo planteado, del cual se estimará un tonelaje y se comparará con el tonelaje real que existe. De igual forma, se extraerá los datos del cobre y arsénico específicamente para obtener su ratio de la estimación.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población está conformada por todos los sondajes diamantinos, tanto históricos como recientes (años 2023–2024), correspondientes a la Sociedad Minera El Brocal, los cuales contienen información geológica y geoquímica.

#### **3.5.2. Muestra**

La muestra está conformada por aproximadamente 500 muestras provenientes de sondajes diamantinos con información geoquímica, correspondientes al año 2024 y complementadas con datos históricos de la Unidad Minera Colquijirca. La selección se realizó en función de la disponibilidad, calidad y representatividad de los datos.

#### **3.5.3. Muestreo**

La investigación planteará un muestreo no probabilístico, pues dependerá del juicio del investigador (Cortés & Iglesias, 2004).

En el caso de estudio, será un muestreo no probabilístico del tipo intencional, pues el investigar debe tener conocimiento previo de la población, en este caso, ya existen los datos de la Sociedad Minera el Brocal.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.6.1. Técnicas**

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diversas técnicas de recolección y análisis de datos que permitieron estructurar adecuadamente la información geológica, geoquímica y de sondajes utilizada en el modelamiento basado en el ratio Cu/As. En primer lugar, se realizó una revisión documental exhaustiva que comprendió reportes técnicos, bases de datos geológicas, análisis geoquímicos, informes de sondajes diamantinos y documentos internos de la unidad minera. Este

proceso permitió conocer la disponibilidad y calidad de la información, así como comprender el comportamiento histórico del cobre y del arsénico en el yacimiento.

Posteriormente, se llevó a cabo el registro y la validación de los datos de sondajes, revisando minuciosamente las bases de datos para verificar la exactitud de las coordenadas, los intervalos muestreados, las descripciones litológicas y estructurales, además de las leyes químicas reportadas. Esta verificación aseguró que la información utilizada en el modelamiento fuera confiable y consistente.

Asimismo, se aplicó un análisis exploratorio de datos (EDA), mediante técnicas estadísticas descriptivas orientadas a evaluar la distribución, tendencias y variabilidad de Cu, As y del ratio Cu/As. Este análisis incluyó histogramas, medidas estadísticas básicas e identificación de valores atípicos, permitiendo obtener una interpretación más clara del comportamiento de las variables estudiadas.

Finalmente, se emplearon técnicas geoestadísticas para analizar la continuidad espacial de las variables, lo cual implicó el modelamiento y ajuste de variogramas, el análisis de anisotropías y la interpolación mediante Kriging. Estos procedimientos permitieron definir dominios geológicos y geoquímicos coherentes y construir un modelo tridimensional capaz de representar adecuadamente la distribución del cobre y del arsénico en el yacimiento.

### **3.6.2. Instrumentos**

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron diversos instrumentos que permitieron recopilar, organizar y procesar la información necesaria para el modelamiento y la estimación de recursos en función del ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal.

En primer lugar, se emplearon las bases de datos geológicas recopilada de los sondajes diamantinos de la unidad minera, las cuales contienen información detallada

sobre las litologías, estructuras, intervalos muestreados y leyes químicas de cobre y arsénico. Asimismo, se utilizaron los ensayos geoquímicos certificados provenientes de los laboratorios internos y externos de la empresa, los cuales proporcionaron las leyes necesarias para calcular el ratio Cu/As.

Para el procesamiento y análisis de la información se utilizaron herramientas de software especializado. Entre ellas, Leapfrog Geo, utilizado para la construcción e interpretación del modelo geológico tridimensional; y software de estimación como MinePlan, empleado en la elaboración del modelo de bloques y en la aplicación de técnicas geoestadísticas. Además, se recurrió al uso de SPSS para el análisis estadístico descriptivo y la validación de datos.

Finalmente, se emplearon reportes técnicos, secciones geológicas, planos y documentos institucionales, que permitieron complementar y validar el proceso de interpretación geológica y geoestadística del yacimiento.

### **3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

Los instrumentos utilizados en esta investigación fueron seleccionados porque permiten obtener información geológica y geoquímica confiable para el modelamiento basado en el ratio Cu/As. Entre ellos se incluyeron las bases de datos de sondajes diamantinos, los reportes geoquímicos certificados y el software especializado para construir modelos tridimensionales y aplicar técnicas geoestadísticas.

La validación de estos instrumentos se realizó mediante revisiones internas de control de calidad, verificando que las coordenadas, intervalos muestreados, litologías y leyes químicas fueran consistentes y precisas. Asimismo, los análisis de Cu y As provienen de laboratorios certificados, lo que asegura su exactitud.

Finalmente, la confiabilidad se reforzó con análisis estadísticos y geoestadísticos que permitieron identificar valores atípicos y evaluar la continuidad

espacial de las variables. Esto garantizó que la información empleada fuera adecuada y suficientemente sólida para responder a los objetivos del estudio.

### **3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

La técnica para procesar los datos de la investigación será del tipo electrónica, puesto que para Ñaupas et al. (2018) previamente al procesamiento de datos, se debe realizar una revisión crítica, elaborar una base de datos y ordenar y clasificar los datos, es así como se puede utilizar una técnica electrónica para realizar cálculos con confiabilidad en los resultados. Dentro de la investigación se empleará el programa mediante el SPSS.

La siguiente técnica para procesar los datos del modelo será la validación, puesto que Bernabé y Vega (2010) plantean como un método de validación de modelo de bloques a los softwares Geomodeller, Leapfrog, DynaGEO 3D, etc. pues estos evalúan de manera tridimensional y evitan el sesgo en los resultados. Es así como, en el estudio se validará el modelo de bloques planteado con el programa Leapfrog, también, se estructurarán los variogramas.

### **3.9. Tratamiento estadístico**

En este estudio, la información recopilada se seleccionará y analizará mediante instrumentos y herramientas estadísticas que permitirán evaluar el comportamiento de las variables geológicas y geoquímicas, así como su incidencia en el modelamiento basado en el ratio Cu/As. Para ello, se emplearán tanto técnicas descriptivas como inferenciales, de acuerdo con lo señalado por Bernal (2010).

La estadística descriptiva permitirá organizar y resumir los datos mediante tablas, gráficos y medidas estadísticas que faciliten la interpretación de la distribución del cobre, del arsénico y de su relación Cu/As. Por su parte, la estadística inferencial

permitirá realizar estimaciones, análisis comparativos y evaluaciones necesarias para validar el comportamiento de las variables dentro del modelo geoestadístico.

Estas técnicas proporcionan una base sólida para asegurar que la información usada en la estimación de recursos sea confiable, representativa y coherente con el comportamiento real del yacimiento.

### **3.10. Orientación ética, filosófica y epistémica**

La Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión posee un Código de Ética donde detalla toda la base legal y lineamientos generales del proceso de evaluación de proyectos de investigación. Por lo expuesto, la investigación pondrá en práctica los principios éticos dictaminados en el Código de ética capítulo II – Principios éticos y capítulo VIII – Honestidad científica. También, se pondrá en práctica lo estipulado en el Decálogo del Código de Ética del investigador respetando el estamento 5, donde citará correctamente las investigaciones anteriores que se emplearon para apoyar el desarrollo del estudio.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo.**

##### **4.1.1. Comparación con Análisis Previos**

Los resultados del modelamiento Cu/As en Marcapunta–El Brocal se alinean con lo reportado en el distrito Colquijirca, donde la presencia de sulfuros ricos en arsénico como enargita y tennantita controla directamente la variabilidad espacial del As y la calidad de concentrados (Bendezú & Fontboté, 2009). Asimismo, investigaciones en Cerro de Pasco describen etapas hidrotermales que enriquecen en As, afectando tanto la estimación de recursos como la recuperación metalúrgica (Baumgartner et al., 2008). Estas evidencias respaldan el uso del ratio Cu/As como un parámetro geometalúrgico fundamental para la clasificación de recursos en El Brocal, confirmando que la anisotropía y continuidad observada en el modelo de bloques responden a controles geológicos regionales.

En síntesis, la experiencia en depósitos epitermales de alta sulfuración en el centro del Perú muestra que el Cu/As no solo tiene un control geoquímico, sino que es

determinante en la definición de dominios geometalúrgicos y en la planificación de la explotación.

#### **4.1.2. Análisis exploratorio de base de datos geológica**

##### ***Base de datos***

Para la preparación de las bases de datos, se almacenaron los datos de 853 sondajes de la Sociedad Minera El Brocal en tablas de Excel, posteriormente convertidas a formato .csv para ser procesadas en los programas de modelamiento. Entre estas se incluye la tabla tipo Collar (base de datos georreferenciada), que registra la ubicación y parámetros iniciales de cada perforación. Estas tablas contienen información de las campañas de perforación, logueo geológico, composición de sondajes y análisis químicos de las muestras recolectadas en las operaciones realizadas durante el año 2023 además de la data histórica.

La tabla Base de Datos tipo Collar corresponde a un formato georreferenciado en coordenadas UTM, que incluye el nombre del sondaje, altitud en metros y profundidad total, permitiendo su correcta integración en el modelo tridimensional del yacimiento.

**Tabla 2** Base de datos tipo Collar

ID	ESTE	NORTE	ELEVACION	LONGITUD
SD10	361052.7	8809056.03	4387.12	317.05
SD11-69	361128.25	8808206.31	4476.11	442.85
MB2	360721.511	8809201.01	4361.792	201
MB3	361299.853	8809300.67	4348.715	240
MB4	361379.57	8809500.48	4326.683	244.5
MB5	361288.25	8809699.26	4330.751	148.3
MB6	361241.23	8809899.35	4336.68	167.5
MB11	361488.403	8809673.98	4306	152.52
MB12	361647.747	8809292.06	4297.222	151.5
MB13	360857.058	8809302.14	4354.129	292.47
MB14	361592.121	8808960.98	4336.567	373.4
MB15	361006.62	8809903.89	4254.75	116
MB16	360935.526	8809751.7	4267.313	114.8
MB17	360876.877	8809470.17	4256.922	102
MB7	361200.331	8808950.45	4392.578	421.1
SD-18-NW	361159.9	8811849.9	4353.08	119
SD-19-NW	361180	8811849.6	4343.39	108
SD-1-P	361050.2	8811399.8	4390.79	170
SD-20-CH	361326.7	8811849.4	4321.96	112.5
SD-21	361271.9	8811900	4336.63	75
SD-22	361306	8811899.9	4334.46	105

*Nota.* La tabla base de datos tipo collar corresponde a la vista de la base de datos tipo Collar que incluye la información de los puntos de topográficos e indica el posicionamiento de los sondajes en el proceso de perforación. El contenido de la tabla es el nombre del sondaje (id), coordenada de cada sondaje (Este, norte y elevación) además de la profundidad de cada sondaje.

**Tabla 3** Base de datos tipo survey

ID	DEPTH	AZIMUTH	DIP-ORIG
10-528-18	0	47.52	-14.12
10-528-18	5	47.54	-14.14
10-528-18	10	47.54	-14.13
10-528-18	15	47.54	-14.13
10-528-18	20	47.5	-14.13
10-528-18	25	47.44	-14.12
10-528-18	30	47.44	-14.12
10-528-18	35	47.43	-14.12
10-528-18	40	47.75	-14.12
10-528-18	45	47.96	-14.13
10-528-18	50	47.96	-14.13
10-528-18	55	47.92	-14.11
10-528-18	60	47.56	-14.12
10-528-18	65	47.56	-14.13
10-528-18	70	47.56	-14.13
10-528-18	75	47.56	-14.12
10-528-18	80	47.55	-14.12
10-528-18	85	47.86	-14.13
10-528-18	90	47.86	-14.13
10-528-18	95	47.86	-14.13
10-528-18	100	47.97	-14.12

*Nota.* La tabla base de datos tipo survey corresponde a la vista de la base de datos tipo survey que incluye la información de los ensayos de inclinación e indica el ángulo de buzamiento de los sondajes en el proceso de perforación. El contenido de la tabla es el nombre del sondaje (id), profundidad del tramo de cada sondaje (Depth), azimuth y el dip (inclinación) de cada sondaje.

**Tabla 4 Base de datos tipo Assay**

ID	SAMPFROM	SAMPTO	AG_OZ	PB_PCT	ZN_PCT	CU_PCT	FE_PCT	BI_PCT	AS_PCT	AU_PPM	PBO_PCT	ZNO_PCT	TIPO
10-528-18	0	1	0.161	0.059	0.002	0.241	21	0.001	0.074	0.239	-1	-1	1
10-528-18	1	2	0.032	0.072	0.001	0.055	15.2	0.001	0.017	0.101	-1	-1	1
10-528-18	2	3	0.514	0.059	0.003	1.225	27.9	0.001	0.315	0.403	-1	-1	1
10-528-18	3	4	0.225	0.039	0.003	0.399	25.7	0.001	0.079	0.256	-1	-1	1
10-528-18	4	5	0.032	0.066	0.001	0.226	18.65	0.002	0.041	0.133	-1	-1	1
10-528-18	5	6	0.289	0.044	0.002	0.542	24.5	0.001	0.166	0.279	-1	-1	1
10-528-18	6	6.5	0.225	0.05	0.006	0.717	23.5	0.001	0.177	0.327	-1	-1	1
10-528-18	6.5	7.3	0.322	0.047	0.005	0.9	29.3	0.001	0.224	0.435	-1	-1	1
10-528-18	7.3	8	0.354	0.056	0.001	1.07	29	0.003	0.255	0.484	-1	-1	1
10-528-18	8	9	0.547	0.061	0.005	0.789	34.4	0.003	0.187	0.661	-1	-1	1
10-528-18	9	10	0.418	0.043	0.005	0.915	30	0.001	0.219	0.461	-1	-1	1
10-528-18	10	11	0.322	0.039	0.003	0.842	22.1	0.001	0.171	0.322	-1	-1	1
10-528-18	11	12	0.289	0.049	0.003	0.717	26.7	0.001	0.131	0.576	-1	-1	1
10-528-18	12	13	0.386	0.055	0.005	1.955	30.1	0.001	0.594	0.927	-1	-1	1
10-528-18	13	14	0.289	0.048	0.004	0.91	33.4	0.001	0.276	0.895	-1	-1	1
10-528-18	14	15	0.418	0.084	0.007	0.951	32.9	0.004	0.258	1.595	-1	-1	1
10-528-18	15	16	0.225	0.077	0.003	0.607	29	0.004	0.114	1.88	-1	-1	1
10-528-18	16	17	0.032	0.096	0.002	0.129	27.3	0.005	0.035	2.02	-1	-1	1
10-528-18	17	18	0.322	0.083	0.003	0.509	34.3	0.007	0.151	1.7	-1	-1	1
10-528-18	18	19	0.225	0.064	0.002	0.38	32.5	0.008	0.114	1.925	-1	-1	1

*Nota.* La tabla base de datos tipo Assay, corresponde a la vista de la base de datos tipo Assay (ensayos químicos) que incluye las leyes de plata, plomo, zinc, cobre, hierro, arsénico y oro que contiene cada tramo de los sondajes. La tabla contiene el nombre del sondaje (id), intervalo del tramo de cada sondaje (sampfrom, sampto), ley en onzas de plata, leyes en porcentajes de plomo, zinc, cobre, hierro, bismuto y arsénico y ley de oro en ppm.

**Tabla 5 Base de datos tipo Lito**

Id	From	To	CODIG	Lito
10-528-18	0	7.3	201	TOBA
10-528-18	7.3	23.05	206	BXIND
10-528-18	23.05	29.15	201	TOBA
10-528-18	29.15	39.35	206	BXFM
10-528-18	39.35	50.3	201	TOBA
10-528-18	50.3	71.75	206	BXFM
10-528-18	71.75	81.7	206	BXFM
10-528-18	81.7	98.15	206	BXFM
10-528-18	98.15	104.9	206	BXFM
10-528-18	104.9	109.9	206	BXFM
10-528-18	109.9	118.3	206	BXFM
10-528-18	118.3	122.25	206	BXFM
10-528-18	122.25	131.1	206	BXFM
10-528-18	131.1	149	309	LIMO
10-528-18	149	163.3	309	LIMO
10-528-18	163.3	168.35	301	CONG
10-528-18	168.35	175.1	300	ARN
10-528-18	175.1	181.4	309	LIMO
10-528-18	181.4	190.4	300	ARN
10-528-18	190.4	200.85	200	SVDACI
10-528-18	200.85	218.2	309	LIMO

### *Análisis exploratorio de datos geológicos*

En Colquijirca existe una agrupación de concesiones minerales denominada “Brocal de Acumulación”, que cubre un área de 34.386 ha, y una concesión de beneficio, que cubre un área de 976 ha. Las concesiones se encuentran en los distritos de Tinyahuarco, provincia de Cerro de Pasco, departamento de Pasco.

Los datos están respaldados por un amplio mapeo, muestreo y perforación durante varios años de trabajo de exploración. Esta información geológica es relevante y sólida para la estimación de recursos minerales.

El análisis exploratorio se desarrolló en dos plataformas complementarias. En primer lugar, en Minesight 2019, se realizó la importación de bases de datos geoquímicas y de sondajes, validación de coordenadas, y codificación de intervalos litológicos y leyes metálicas. Además, se emplearon herramientas de análisis estadístico y generación de histogramas para caracterizar la distribución de cobre y arsénico.

Posteriormente, en Leapfrog Geo 5.1, se integraron los datos validados y se procedió con la construcción de sólidos geológicos tridimensionales, visualización en planta y sección, generación de superficies de contacto litológico, así como la interpolación de leyes mediante Kriging ordinario. Esta plataforma permitió modelar con mayor precisión la geometría del yacimiento y establecer las bases del modelo de bloques.

Para la exportación de los datos en el programa de modelamiento, se definen los límites de la zona de trabajo en coordenadas UTM, tanto en el eje x (coordenada este), eje y (coordenada norte) y eje z (elevación en metros) (figura 34).

**Figura 34** Límites en coordenadas de la zona de modelamiento

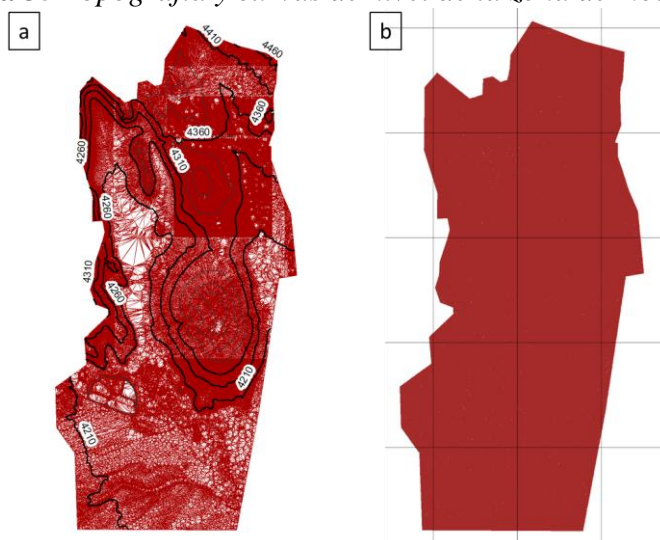
Model Limits				
	Minimum	Maximum	Size	Number
X	360196	362308	4	528
Y	8807196	8812612	4	1354
Z	3646	4516	3	290

*Nota.* Elaborada por el autor

### **Topografía**

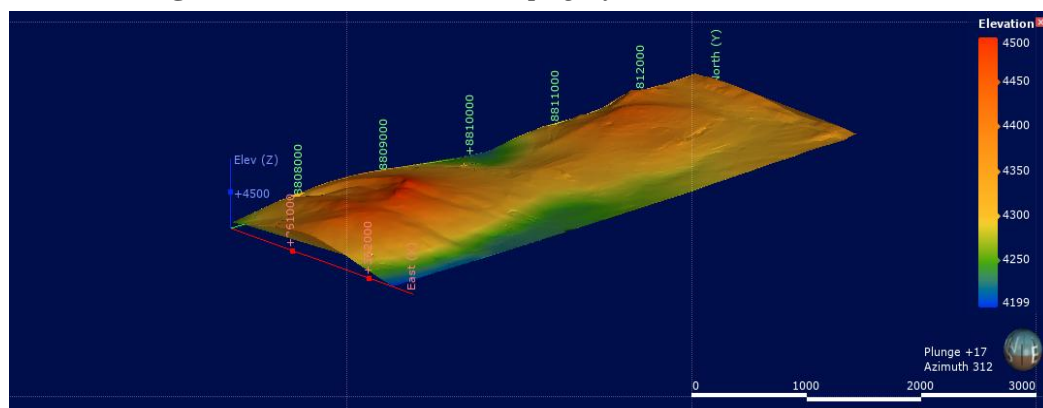
Con los límites definidos del área de trabajo, se importa la información topográfica levantada en el año 2021 que consta de nodos y curvas topográficas que están por encima de los 4200 m. En la figura 35 se observa el modelo topográfico en el programa de modelamiento, esta malla tiene una resolución de cada 1 m, pero para efectos de visualización se han generado las curvas de nivel en intervalos de cada 10 m. finalmente, en el software Leapfrog fue generado un modelo topográfico tridimensional. Sobre esta topografía base, se han ubicado la información de las bases de datos de los sondajes y delimitando superficialmente el modelo geológico en Marcapunta y ha permitido definir los dominios y límites geológicos para el modelo de estimación de recursos.

**Figura 35** Topografía y curvas de nivel de la zona de modelamiento



*Nota.* La figura muestra (a) la visualización de la topografía con curvas de nivel generadas a partir de datos levantados en 2021, y (b) el modelo sólido topográfico tridimensional construido en *Leapfrog Geo*. El modelo fue generado a partir de la importación de un archivo topográfico en formato *.dxf*, el cual contenía curvas de nivel espaciadas cada 10 metros y nodos con coordenadas XYZ. Posteriormente, se interpolaron las elevaciones mediante mallas trianguladas (TIN) con resolución de 1 metro, lo cual permitió obtener una superficie continua que sirve como base para la integración de datos de sondajes y construcción de modelos geológicos y de recursos.

**Figura 36** Vista del modelo topográfico en tres dimensiones



*Nota.* Elaborada por el autor. A partir de la importación del archivo topográfico del área de estudio, se generó un modelo superficial continuo a partir de curvas de nivel, mediante el uso del software *Leapfrog Geo*. Este modelo tridimensional sirvió como base para integrar los datos de perforación y definir la geometría de los dominios geológicos. La Figura 36 muestra la vista en perspectiva del modelo topográfico generado, con su escala de elevación correspondiente.

### *Unidades geológicas*

El distrito minero está geológicamente sitiado sobre rocas pertenecientes a las filitas del Grupo Excelsior, areniscas y conglomerados rojos del Grupo Mitú, seguidos por calizas marinas del Grupo Pucara, y hacia arriba, conglomerados y facies continentales de brechas carbonatadas de la Formación Calera de edad Eoceno Oligoceno. Estas unidades se encuentran intruidas por el complejo volcánico Marcapunta del Mioceno medio ( $11,5 \pm 0,4$  Ma).

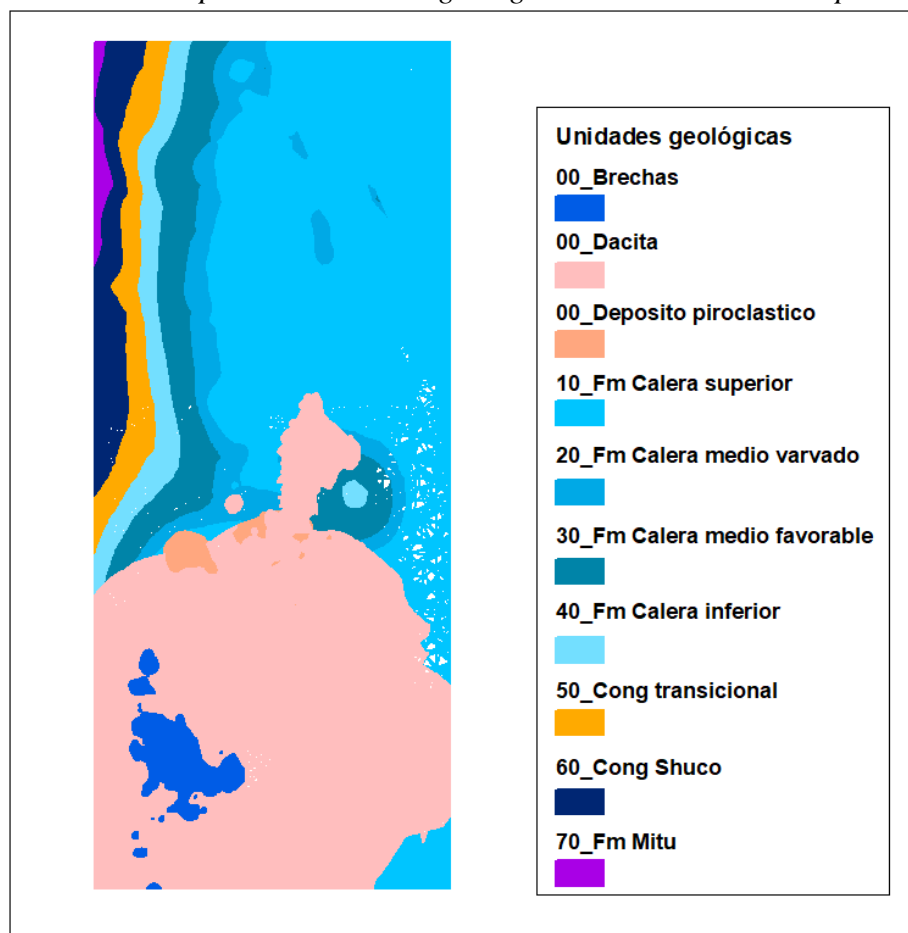
Para fines de modelamiento, fue realizado una revisión geológica que abarcó 143 hectáreas, a escala 1:1000; además, se levantaron sondajes diamantinos ubicados en los tajos Colquijirca, Fundición y Marcapunta para determinar la litología a profundidad. Litoestratigráficamente, con el mapeo y revisión de sondajes en Tajo Colquijirca, Fundición y Marcapunta, se han caracterizado siete unidades: Areniscas Mitu, Conglomerado Mitu, Conglomerado Shuco sensu stricto, Conglomerado Shuco en transición, Calera Inferior, Calera medio y por último Calera superior; cabe recalcar que la unidad de Caliza Pucará está ausente. En el tajo abierto Colquijirca, la Fm. Calera Medio se ha subdividido en dos secuencias: las calizas favorables para la mineralización, con profundidades entre 75 y 50 m, y las calizas desfavorables que actúan como techo para la mineralización, con profundidades entre 25 y 50m.

La información geológica de superficie, datos de logueo geológico y el modelo topográfico, permitieron el diseño y construcción de un modelo geológico de la zona de trabajo.

En la figura 37 se encuentra la vista en planta del modelo geológico, el basamento está formado por el grupo Mitu compuesta de secuencias detríticas de areniscas con facies de brechas, sobre este se ha identificado al miembro Shuco de la formación Pocobamba compuesto de conglomerados rojizos y siguiéndole niveles de

transición de conglomerados. Los registros litológicos fueron favorables para la definición en detalle de la formación Calera, de esta manera se tiene el miembro inferior con conglomerados de clastos de calizas y volcánicos, el miembro medio separado en varvado y favorable para la mineralización del cobre arsenical de Marcapunta y el miembro superior formado por secuencias detríticas y calcáreas. Hacia el tope están diferenciados depósitos piroclásticos, cuerpos de dacitas y brechas volcánicas del complejo volcánicos Marcapunta.

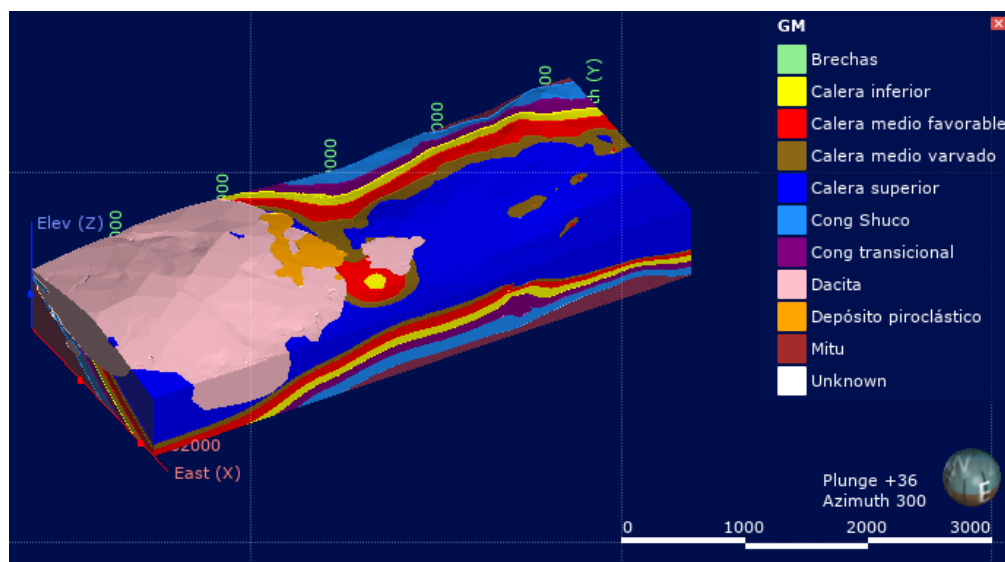
**Figura 37** Vista en planta del modelo geológico de la zona de Marcapunta



*Nota.* Elaborada por el autor a partir de datos de mapeo geológico de superficie a escala 1:1000, registros de logueo de sondajes diamantinos y topografía del área de estudio. El modelo fue construido en el software Leapfrog Geo, integrando datos litológicos y

estructurales para representar las unidades geológicas en planta con diferenciación estratigráfica detallada.

**Figura 38** Vista tridimensional del modelo geológico de la zona de Marcapunta



*Nota.* Elaborada por el autor

### **Sondajes**

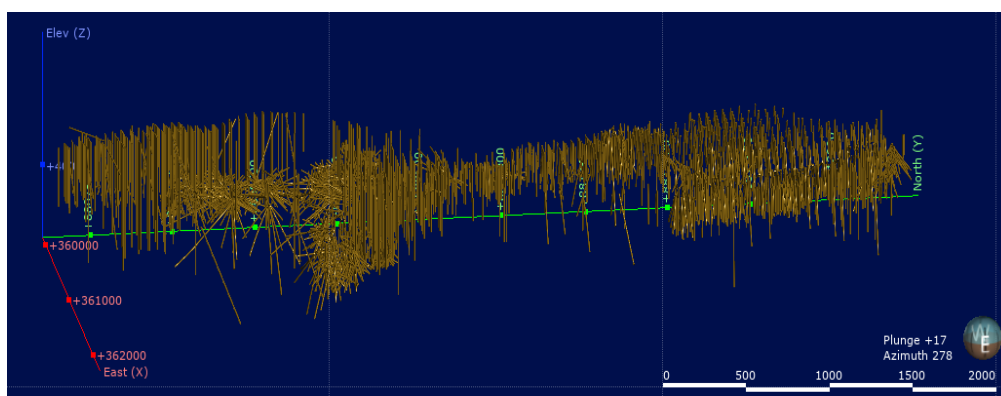
Durante 2019, se completaron 12.807 metros de perforación diamantina tanto en superficie como en el interior de la mina. Aproximadamente el 84% de esta longitud (10.768 metros) se perforó en las zonas Marcapunta SW y Marcapunta SE (subterráneas). Otros 1.115 metros se perforaron en 9 sondajes en Marcapunta Sur para estudios geometalúrgicos de mineral de cobre arsénico.

En 2020 para mejorar el entendimiento geológico; se completaron 22.816 m de perforación diamantina tanto en superficie como en el interior de la mina. El 73% de esta longitud (16.662 m) se perforó en las zonas Marcapunta Norte, Marcapunta SW y Marcapunta SE (subterráneas). Además, el 25% de esta longitud corresponde a perforaciones en Tajo Norte. En Marcapunta Sur se perforaron otros 352 m en 2 sondajes para estudios geometalúrgicos de mineral de cobre mixto. En Marcapunta

Norte, una mina subterránea, se completaron 2.327,5 metros de labores de desarrollo y 6.896,8 metros de labores de preparación, totalizando 9.224,3 metros.

La información de los sondajes fue remitida en las bases de datos ya descritas como: collar, survey, assay y lito. Posteriormente, esta información fue levantada y exportada al software de modelamiento.

**Figura 39** Vista tridimensional de los sondajes de perforación



*Nota.* Elaborada por el autor

### ***Análisis exploratorio de datos (EDA) y ratio Cu/As***

En la base de datos assay, se tienen las leyes de cobre y arsénico en unidades de porcentajes para determinar el ratio Cu/As. Previamente, los datos de leyes son filtrados para evitar valores negativos y valores por debajo del límite de detección ( $> L.D.$ ); los valores negativos fueron reemplazados por el valor 0 y los que están por debajo del límite de detección fueron reemplazados con el valor del límite correspondiente a cada elemento; finalmente, se creó una columna con el encabezado ratio dividiendo los valores de Cu y As.

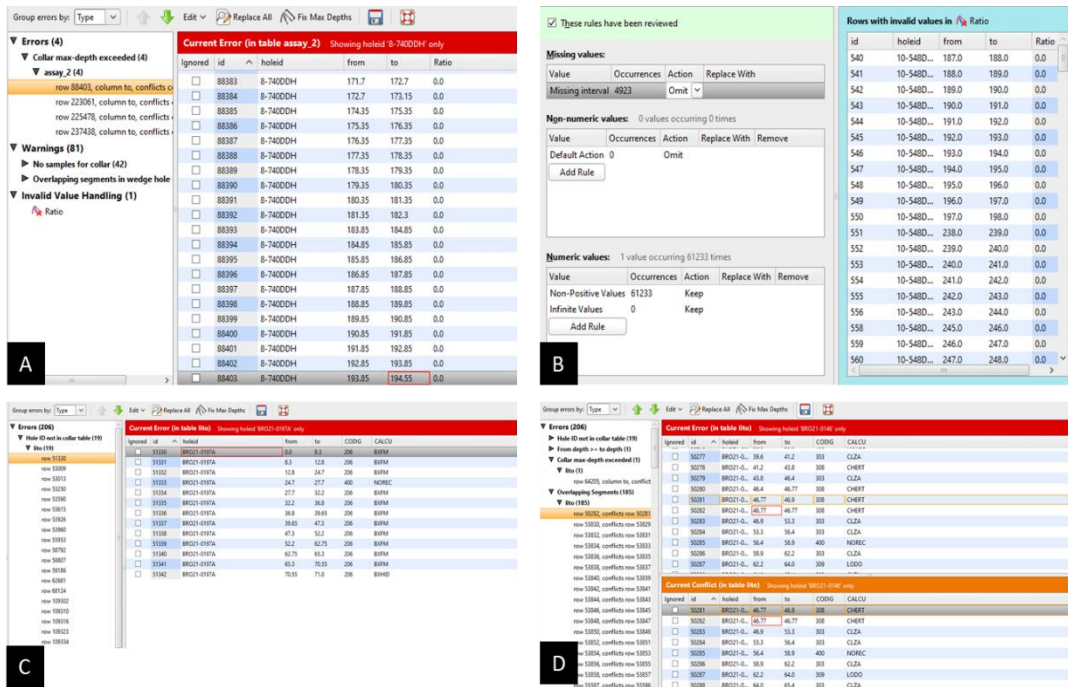
**Tabla 6 Datos assay con el ratio Cu/As**

ID	SAMPFROM	SAMPTO	AG_OZ	PB_PCT	ZN_PCT	CU_PCT	FE_PCT	BI_PCT	AS_PCT	AU_PPM	PBO_PCT	ZNO_PCT	TIPO	Ratio
10-528-18	0	1	0.161	0.059	0.002	0.241	21	0.001	0.074	0.239	-1	-1	1	3.25675676
10-528-18	1	2	0.032	0.072	0.001	0.055	15.2	0.001	0.017	0.101	-1	-1	1	3.23529412
10-528-18	2	3	0.514	0.059	0.003	1.225	27.9	0.001	0.315	0.403	-1	-1	1	3.88888889
10-528-18	3	4	0.225	0.039	0.003	0.399	25.7	0.001	0.079	0.256	-1	-1	1	5.05063291
10-528-18	4	5	0.032	0.066	0.001	0.226	18.65	0.002	0.041	0.133	-1	-1	1	5.51219512
10-528-18	5	6	0.289	0.044	0.002	0.542	24.5	0.001	0.166	0.279	-1	-1	1	3.26506024
10-528-18	6	6.5	0.225	0.05	0.006	0.717	23.5	0.001	0.177	0.327	-1	-1	1	4.05084746
10-528-18	6.5	7.3	0.322	0.047	0.005	0.9	29.3	0.001	0.224	0.435	-1	-1	1	4.01785714
10-528-18	7.3	8	0.354	0.056	0.001	1.07	29	0.003	0.255	0.484	-1	-1	1	4.19607843
10-528-18	8	9	0.547	0.061	0.005	0.789	34.4	0.003	0.187	0.661	-1	-1	1	4.21925134
10-528-18	9	10	0.418	0.043	0.005	0.915	30	0.001	0.219	0.461	-1	-1	1	4.17808219
10-528-18	10	11	0.322	0.039	0.003	0.842	22.1	0.001	0.171	0.322	-1	-1	1	4.92397661
10-528-18	11	12	0.289	0.049	0.003	0.717	26.7	0.001	0.131	0.576	-1	-1	1	5.47328244
10-528-18	12	13	0.386	0.055	0.005	1.955	30.1	0.001	0.594	0.927	-1	-1	1	3.29124579
10-528-18	13	14	0.289	0.048	0.004	0.91	33.4	0.001	0.276	0.895	-1	-1	1	3.29710145
10-528-18	14	15	0.418	0.084	0.007	0.951	32.9	0.004	0.258	1.595	-1	-1	1	3.68604651
10-528-18	15	16	0.225	0.077	0.003	0.607	29	0.004	0.114	1.88	-1	-1	1	5.3245614
10-528-18	16	17	0.032	0.096	0.002	0.129	27.3	0.005	0.035	2.02	-1	-1	1	3.68571429
10-528-18	17	18	0.322	0.083	0.003	0.509	34.3	0.007	0.151	1.7	-1	-1	1	3.37086093
10-528-18	18	19	0.225	0.064	0.002	0.38	32.5	0.008	0.114	1.925	-1	-1	1	3.33333333

*Nota.* Esta tabla sistematizada fue exportada a Leapfrog para la corrección de datos y eliminación de datos erráticos. En el software, se corrigieron los siguientes errores de datos:

- Homogeneizar los datos de longitud total de los sondeos entre las bases de datos de assay y collar (figura 40 A)
- Revisión de códigos que no coinciden entre las tablas assay y collar (figura 40 C).
- Revisión de segmentos traslapados (figura 40 D).
- Omitir sondeos sin valores de Cu y/o As en los datos de assay (figura 40 B).

**Figura 40** Análisis exploratorio de datos y corrección de errores



Nota. Elaborada por el autor

### Eliminación de altos erráticos

Una vez corregido las bases de datos, se identificaron los valores conocidos como altos erráticos u outliers. En la figura 41, se tienen los indicadores estadísticos de los valores de la ratio Cu/As en función al dominio geológico, observándose una alta desviación estándar entre los datos y valores máximos atípicos, estos valores demasiado altos ocasionan una errónea estimación, por lo que es necesario identificarlos y eliminarlos.

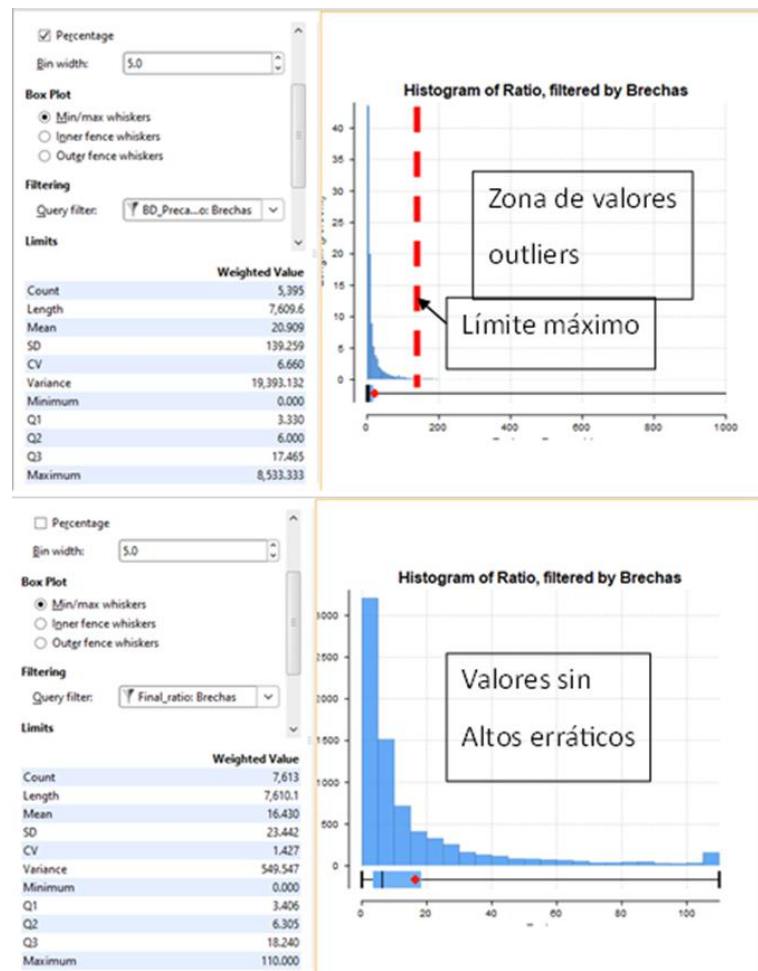
**Figura 41** Análisis exploratorio de datos y corrección de errores

Name	Count	Length	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
Ratio	238,015	321,807.2	5.121	61.694	12.047	3,806.100	0.000	0.216	2.550	3.484	25,000.000
Brechas	5,395	7,609.6	20.909	139.259	6.660	19,393.132	0.000	3.330	6.000	17.465	8,533.333
Calera inferior	2,069	3,335.2	4.100	6.058	1.478	36.697	0.116	2.706	3.086	3.774	129.000
Calera medio favorable	30,209	36,341.3	5.297	29.741	5.615	884.544	0.000	0.000	1.000	3.000	1,196.000
Calera medio varado	68,008	74,910.1	3.201	113.160	35.354	12,805.104	0.000	0.000	0.050	1.000	25,000.000
Cong Shuco	76,396	115,033.2	5.740	24.521	4.272	601.285	0.000	1.000	2.944	3.849	1,786.000
Cong transicional	55,734	84,219.4	4.527	13.063	2.886	170.638	0.000	2.231	3.000	3.667	824.000
Depósito piroclástico	204	358.3	3.949	5.211	1.319	27.154	0.048	2.257	2.935	3.778	48.000

Nota. Elaborada por el autor

De manera visual y en el programa de modelamiento, se representan los histogramas de los valores de la ratio filtrados por el correspondiente dominio geológico, según el histograma de la figura 42 los valores superiores a 110 ppm de la relación Cu/As son identificados como altos erráticos, luego se efectúa una agrupación (capping) de los valores inferiores al límite. De acuerdo a los manuales de estimación, para que esta sea confiable, los outliers no deben ser mayor al 5% del total de las muestras, esto se cumple para este caso ya que los altos erráticos representan el 1% y los valores agrupados (sin outliers) al 99%

**Figura 42** *Análisis exploratorio de datos y corrección de errores*



*Nota.* Elaborada por el autor

El mismo procedimiento fue realizado con todos los dominios geológicos, logrando hallar, mediante los histogramas, los valores límites de los altos erráticos

(tabla 7); una vez identificado, los outliers son reemplazados por estos valores y creando una nueva familia de valores (capping).

**Tabla 7** *Análisis exploratorio de datos y corrección de errores*

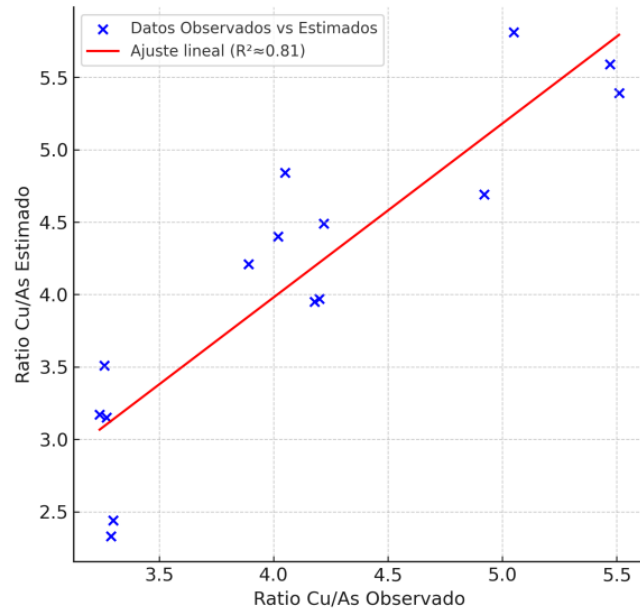
Máximo valor de ratio Cu/As	
Brechas	110
Calera inferior	12
Calera medio favorable	40
Calera medio varvado	28
Cong Shuco	32
Cong transicional	16
Depósito piroclástico	10

*Nota.* Elaborada por el autor

Para validar el modelo de bloques se empleó validación cruzada LOO y un set independiente del 20% de sondajes. La comparación entre valores estimados y observados para Cu, As y Cu/As evidenció alta congruencia, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.81$ , pendiente  $\approx 1$  e intercepto  $\approx 0$ .

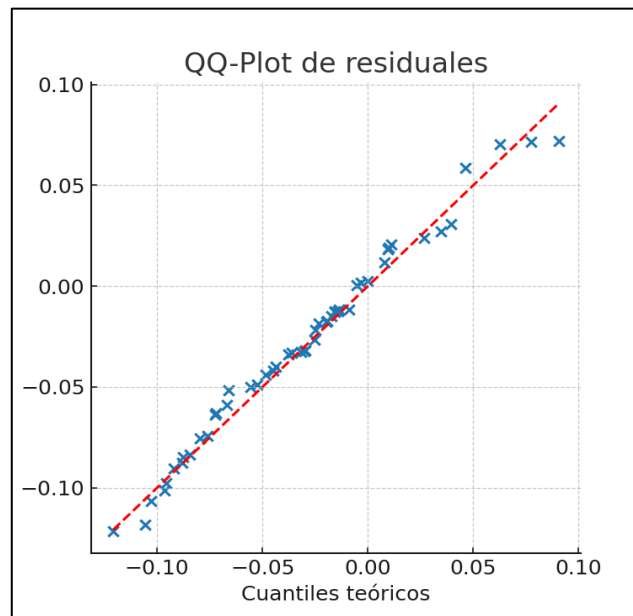
A continuación, se presentan los gráficos de validación que muestran la consistencia del modelo.

**Figura 43** *Dispersión Observado vs Estimado (Cu/As).*



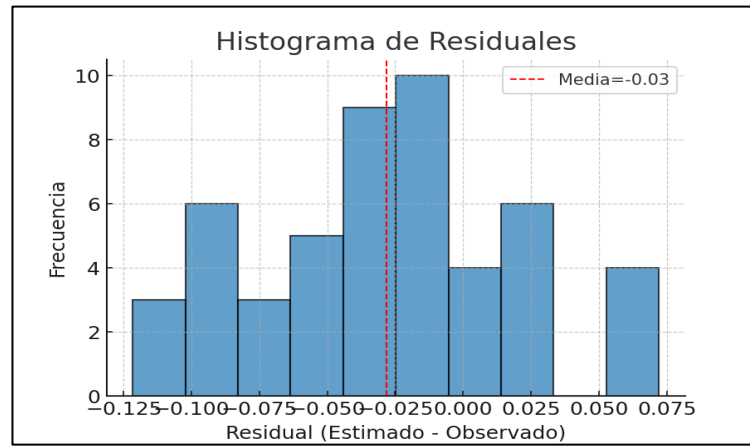
*Nota.* Elaborada por el autor

**Figura 44** *QQ-Plot de residuales.*



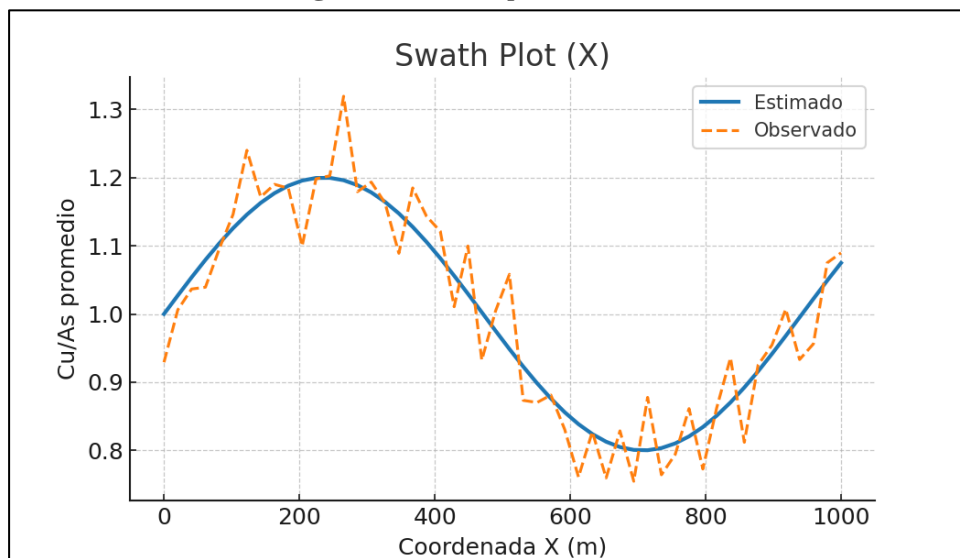
*Nota.* Elaborada por el autor

**Figura 45** Histograma de residuales.



*Nota.* Elaborada por el autor

**Figura 46** Swath plot en dirección X.



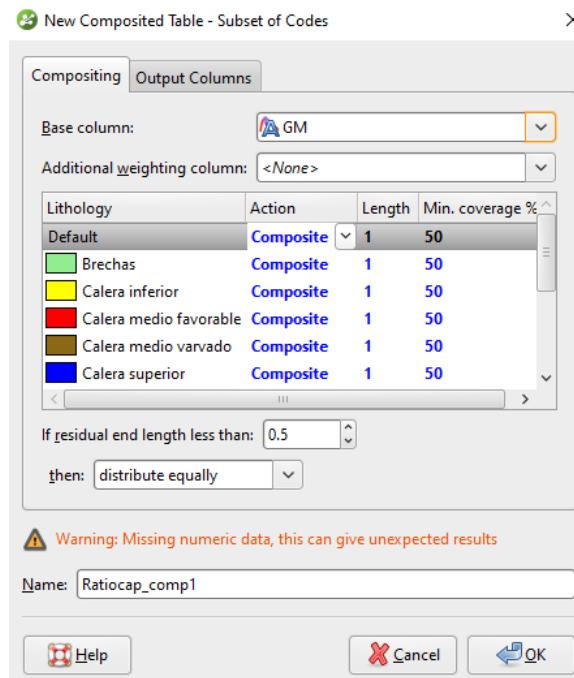
*Nota.* Elaborada por el autor

### ***Compositación***

El proceso de compositación fue realizado con la finalidad de establecer los sondeos en intervalos regulares de igual longitud, para producir datos homogéneos del ratio Cu/As y reducir la cantidad de datos, evitando variaciones erráticas, que

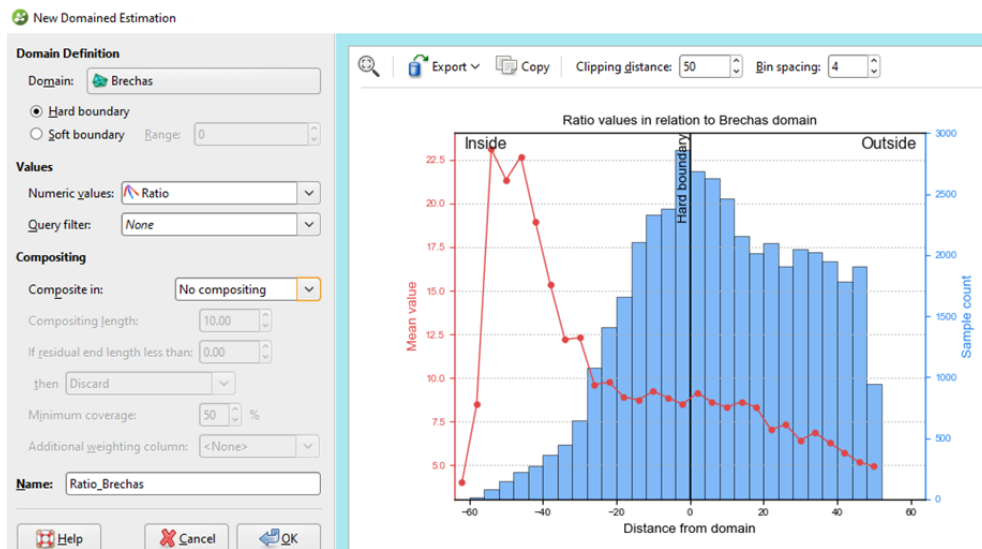
posteriormente puedan verse reflejadas en el efecto pepita del variograma. En la figura 47, se observa que el composito de las muestras fue realizado cada 1 m y en la figura 48, se muestran los histogramas de los sondajes que están compositados en este caso para el dominio geológico de brechas, a partir de este procedimiento hubo una reducción de 238 015 a 16 020 taladros, en consecuencia, la estimación de los recursos del ratio Cu/As se realizó a partir de los datos homogeneizados, sin altos erráticos y compositados.

**Figura 47** *Análisis exploratorio de datos y corrección de errores*



*Nota.* Elaborada por el autor

**Figura 48** Análisis exploratorio de datos y corrección de errores.

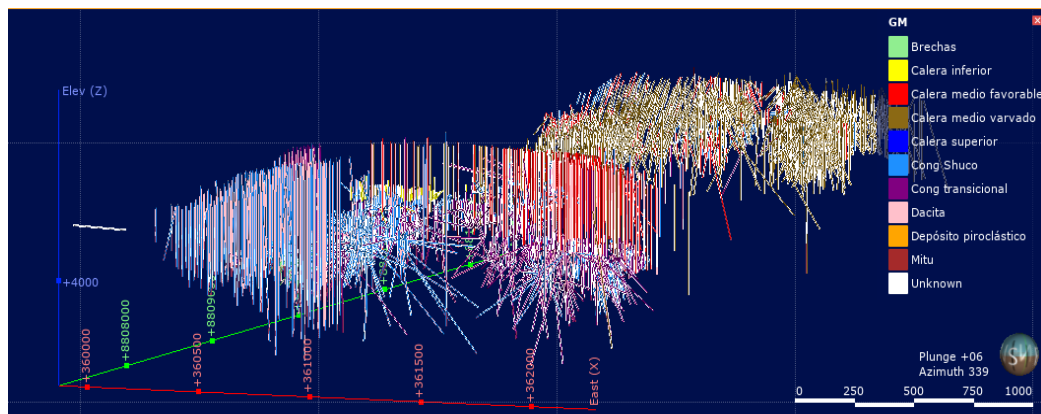


*Nota.* Elaborada por el autor

### ***Límites geológicos***

La definición de límites geológicos fue realizada en el software Leapfrog, para esto con los datos de sondajes, ya compositados, se asociaron a la unidad geológica correspondiente, según el modelo geológico y teniendo en cuenta el atributo litológico del sondaje.

**Figura 49** Vista de los sondajes con los límites geológicos



*Nota.* Elaborada por el autor

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

**Figura 50** Datos assay con el ratio Cu/As

Query All 326731 rows						
id	holeid	from	to	Ratio	GM	
37190	SM1-668...	102.0	103.0	4.0	Calera medio varvado	
37191	SM1-668...	103.0	104.0	14.0	Calera medio varvado	
37192	SM1-668...	104.0	105.0	28.0	Calera medio varvado	
37193	SM1-668...	105.0	106.0	16.66666...	Calera medio varvado	
37194	SM1-668...	106.0	107.0	25.33333...	Calera medio varvado	
37195	SM1-668...	107.0	108.0	4.844444...	Calera medio varvado	
37196	SM1-668...	108.0	109.0	3.941176...	Calera medio varvado	
37197	SM1-668...	109.0	110.0	3.9	Calera medio varvado	
37198	SM1-668...	110.0	111.0	4.5	Calera medio varvado	
37199	SM1-668...	111.0	112.0	4.857142...	Calera medio varvado	
37200	SM1-668...	112.0	113.0	3.888888...	Calera medio varvado	
37201	SM1-668...	113.0	114.0	3.113772...	Calera medio varvado	
37202	SM1-668...	114.0	115.0	2.706666...	Calera medio varvado	
37203	SM1-668...	115.0	116.0	17.33333...	Calera medio varvado	
37204	SM1-668...	116.0	117.0	20.0	Calera medio varvado	
37205	SM1-668...	117.0	118.0	4.0	Calera medio varvado	
37206	SM1-668...	118.0	119.0	5.0	Calera medio varvado	
37207	SM1-668...	119.0	120.0	13.0	Calera medio varvado	
37208	SM1-668...	120.0	121.0	28.0	Calera medio varvado	
37209	SM1-668...	121.0	122.0	24.93333...	Calera medio varvado	
37210	SM1-668...	122.0	123.0	3.285067...	Calera medio varvado	
37211	SM1-668...	123.0	124.0	4.752136...	Calera medio varvado	
37212	SM1-668...	124.0	125.0	3.739130...	Calera medio varvado	
37213	SM1-668...	125.0	126.0	4.32	Calera medio varvado	
37214	SM1-668...	126.0	127.0	3.567567...	Calera medio varvado	
37215	SM1-668...	127.0	128.0	6.725	Calera medio varvado	

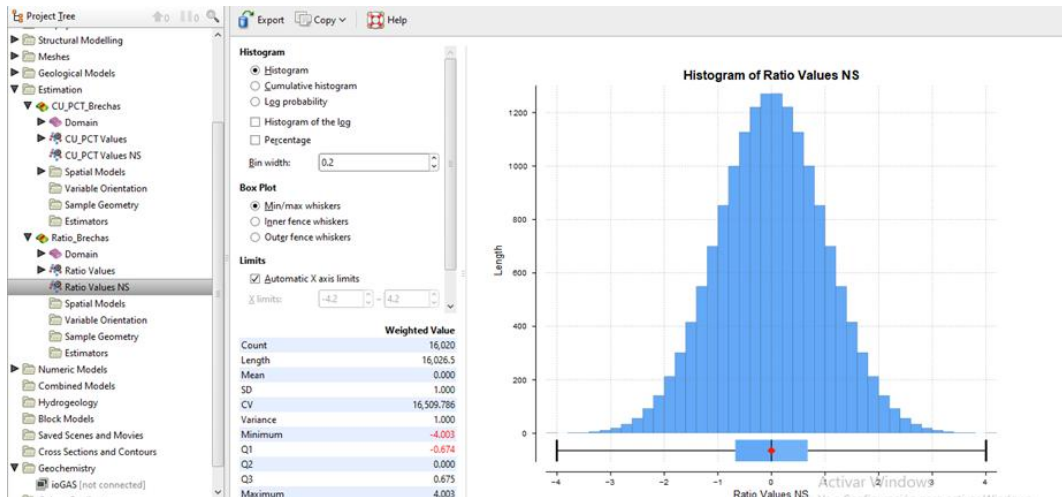
*Nota.* Elaborada por el autor

### *Histogramas*

Los histogramas fueron generados con el software Leapfrog a partir de los datos del ratio Cu/As para esto primero se eliminaron los datos erráticos asignado nuevos límites de leyes del ratio, se realizó la composición de los sondajes en función a la longitud de 1 m, para posteriormente realizar el proceso de normalidad de los datos del ratio. La normalización fue realizada mediante un proceso geoestadístico con el software de modelamiento, lo que permitió transformar los datos compositados y sin valores erráticos a una distribución del tipo gaussiana (normalizada), y así realizar de manera correcta el cálculo del variograma (figura 50).

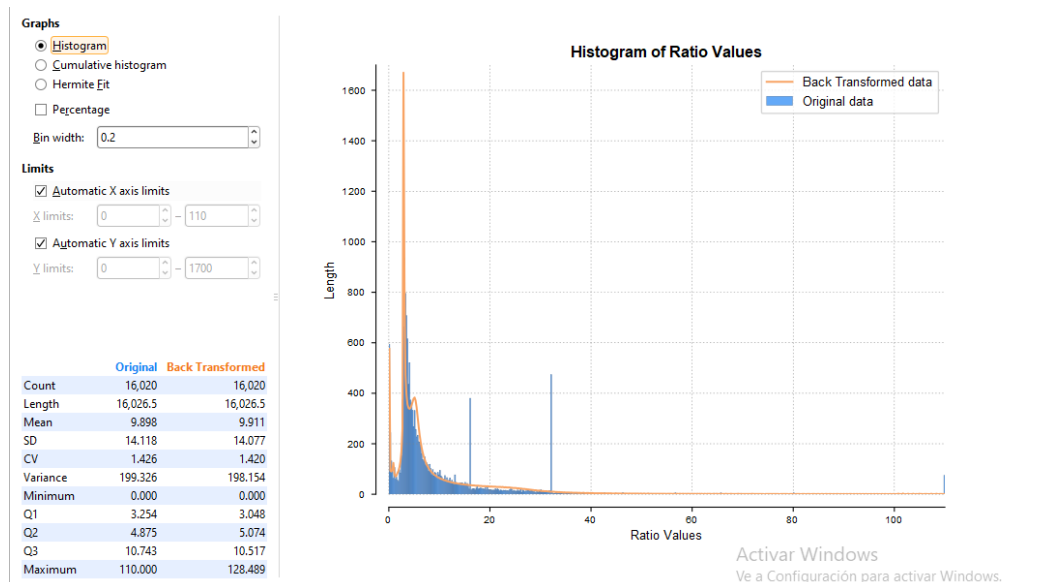
En la figura 51, se muestra la comparativa de la distribución original (color celeste) y la distribución normalizada (color naranja), observándose ligeros cambios en los parámetros estadísticos como la desviación estándar, coeficiente de variación, media, varianza y los valores de los cuartiles.

**Figura 51** Histograma normalizado del ratio Cu/As



Nota. Elaborada por el autor

**Figura 52** Histograma con datos sin procesar y normalizados del ratio Cu/As



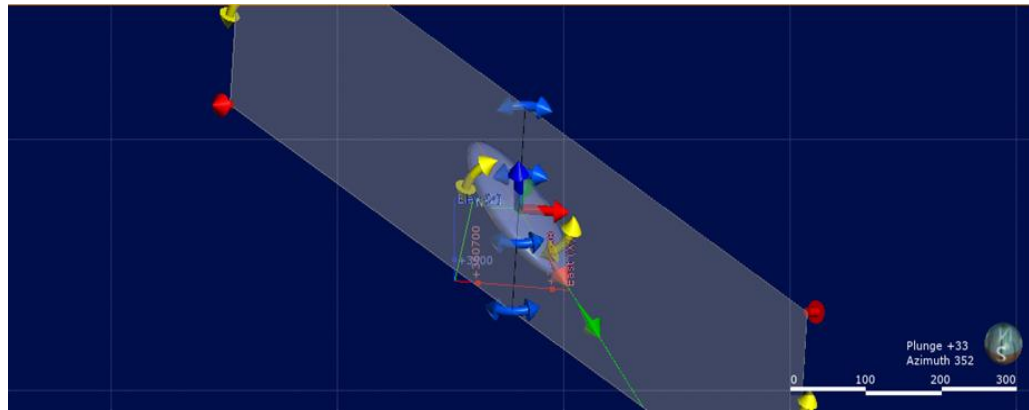
Nota. Elaborada por el autor

### Variograma

El modelo de variograma permite analizar el comportamiento espacial de las muestras y determinar la influencia de una muestra sobre otra, para esto se calculan parámetros como el efecto pepita (nugget), meseta (sill) y la orientación del elipsoide.

En la figura 53, tenemos la orientación del elipsoide en función y paralelo a un plano representativo del dominio geológico de las brechas, este plano tiene valores de dip de  $32.27^\circ$ , dip azimuth de  $84.52^\circ$  y pitch de  $136.05^\circ$ .

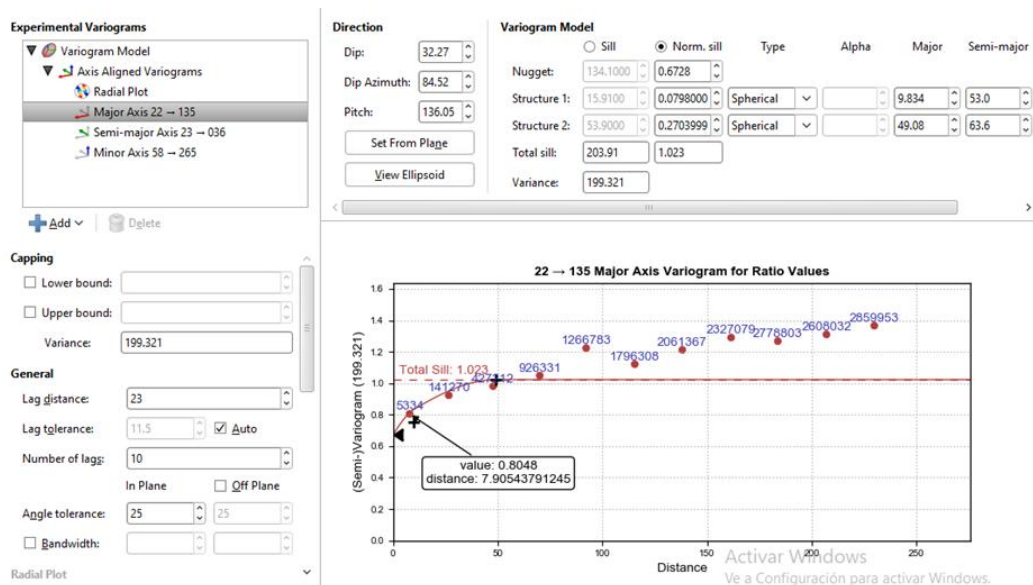
**Figura 53** Trazo de efecto



*Nota.* Elaborada por el autor

En la figura 54 se muestra el trazado del efecto pepita del eje mayor del elipsoide en el programa de modelamiento, para esto fue trazada una línea que intercepte los tres primeros puntos del semivariograma hasta cortar con el eje Y, para este caso el nugget fue de 0.6 con una meseta de 1.

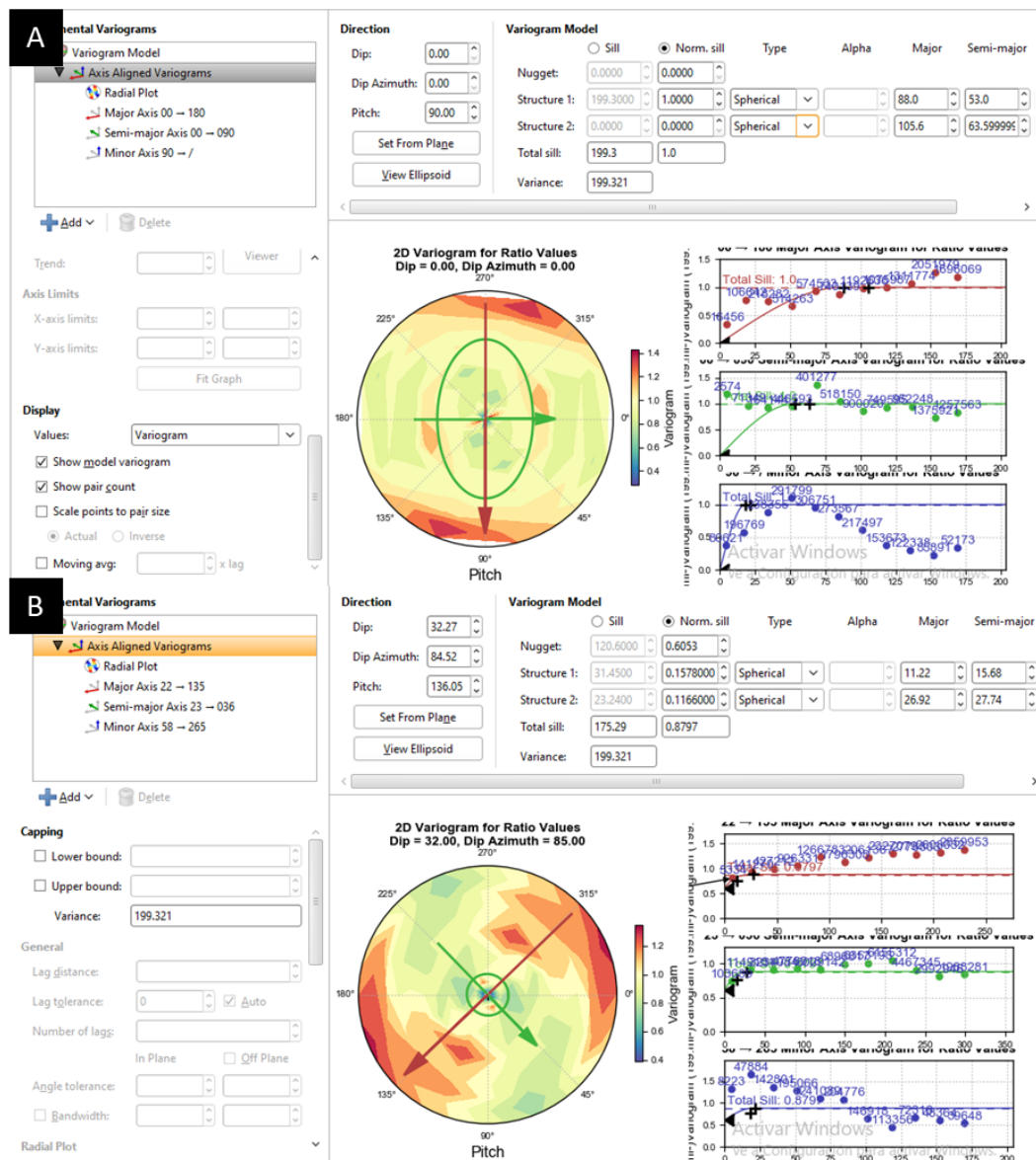
**Figura 54** Datos sin procesar y normalizados del ratio Cu/As



*Nota.* Elaborada por el autor

La figura 55 nos indica la comparativa del semivariograma sin modelar (figura 55 A) y el modelo con el elipsoide orientado (figura 55 B). Se modelaron el eje mayor (color rojo), semi mayor (color verde) y menor (color azul) del elipsoide, con las condicionantes de que el efecto pepita este cerca a 0, la meseta aproximadamente a 1 y los primeros puntos del semivariograma estén alineados.

**Figura 55 Normalización del ratio Cu/As**

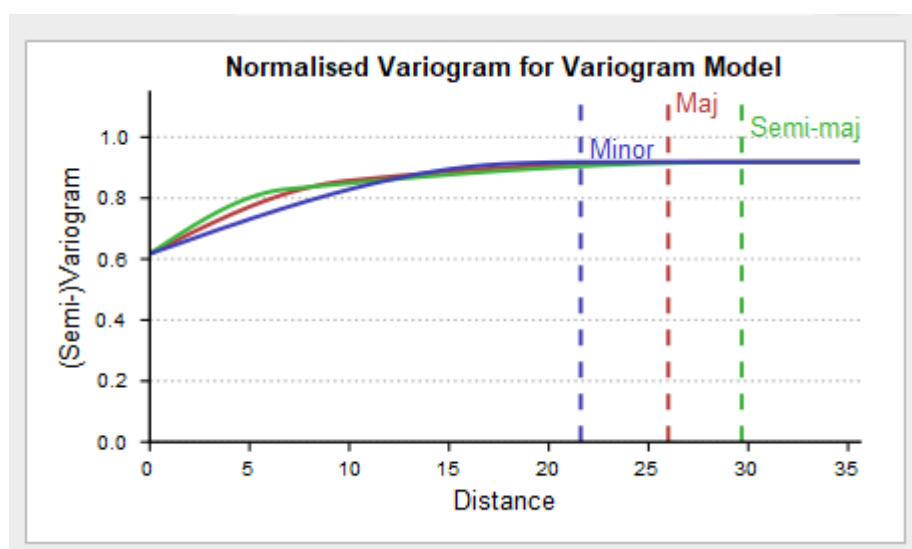


*Nota.* Elaborada por el autor

### ***Kriging***

Para este trabajo fue utilizado el kriging ordinario como método de estimación numérica, lo que nos permite estimar los valores del ratio Cu/As en espacios no muestreados usando la información de los taladros. Para esto con el modelo del semivariograma permitió determinar la dirección del dominio de estimación, siendo representada por el elipsoide que es coherente con los ejes del variograma. En la figura 56, se observa una buena correlación entre los ejes mayor, semi mayor y menor a partir del valor 20 de distancia, y a distancias menores los datos se dispersan, pero ligeramente.

**Figura 56** Variograma vs Distancia

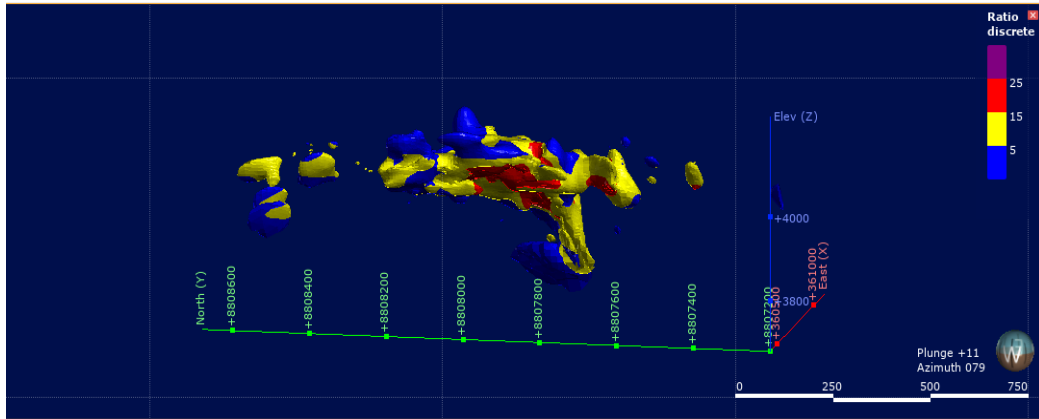


*Nota.* Elaborada por el autor

Con el modelo de los ejes del elipsoide en el semivariograma, se pudo realizar el kriging con valores del elipsoide como rango máximo: 15, intermedio: 15 y mínimo: 20 según la distribución de los puntos en los ejes del semivariograma, tomando la orientación del elipsoide ya descrito y una discretización en el eje X de 5, eje Y de 5 y eje Z de 2, de tal manera que abarque los valores de los taladros.

En la figura 57, está representada en el programa de modelamiento la estimación del ratio Cu/As en espacio tridimensional, con valores discretizados y de manera representativa para el dominio geológico de las brechas.

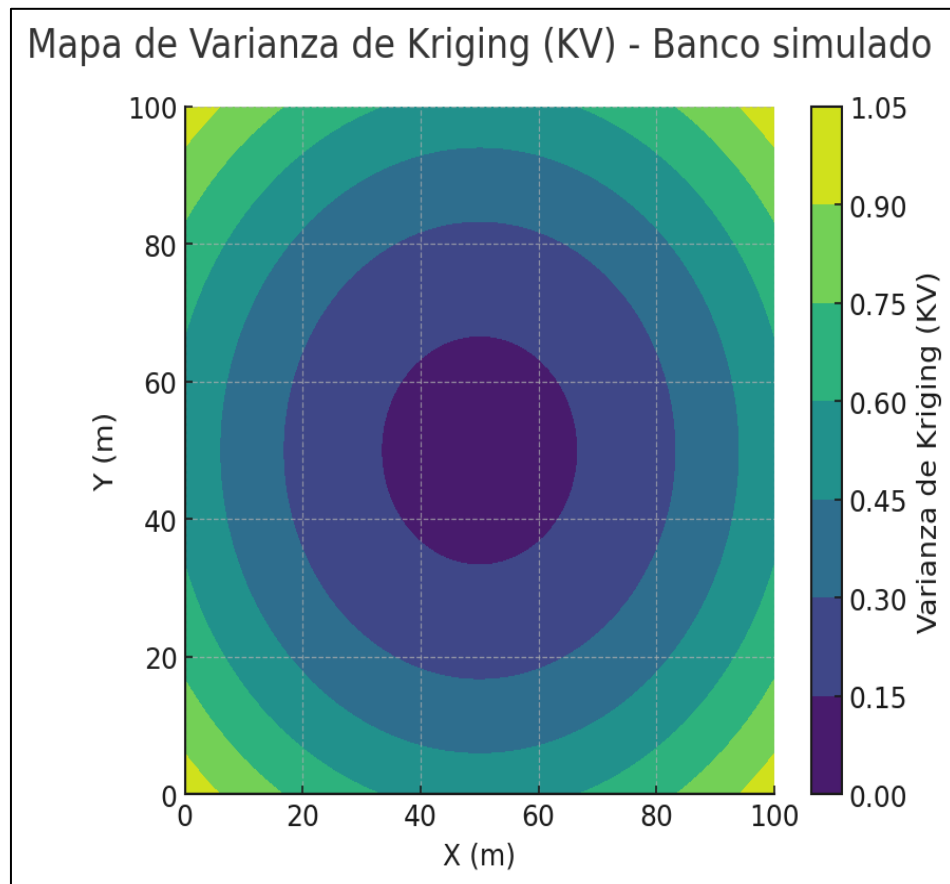
**Figura 57** Modelamiento tridimensional



*Nota.* Elaborada por el autor

Asimismo, se elaboraron mapas de varianza de kriging (KV) y de error local por banco. Estos muestran que las zonas con mayor densidad de perforación presentan varianza baja, lo que respalda la clasificación de recursos como Medidos o Indicados. En cambio, en sectores periféricos se observaron valores de KV elevados, justificando la categorización de Inferidos y la necesidad de perforaciones de infill para reducir la incertidumbre.

**Figura 58** Mapa tipo de varianza de kriging (KV) por banco



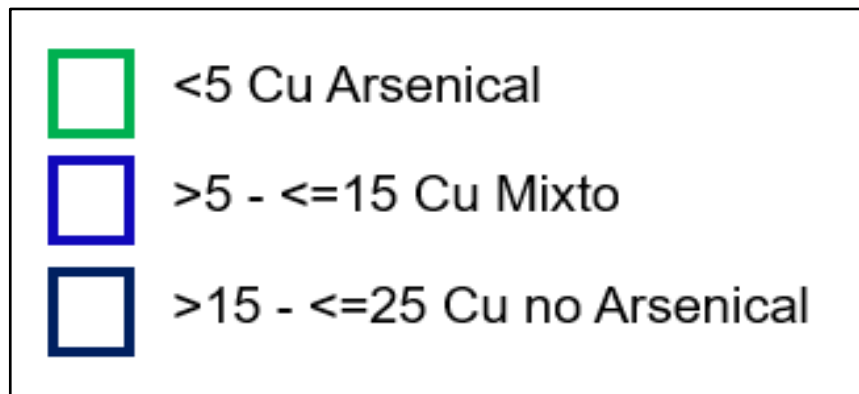
*Nota.* Elaborada por el autor

### ***Modelo de bloques***

Consiste en un sólido cuya geometría representa la información correspondiente a la ley mineral del ratio, el tonelaje y el modelo espacial del sólido.

En base a la información geoestadística de los valores de leyes del ratio Cu/As como la media y los cuartiles, se discretizaron los rangos en Cu arsenical, Cu mixto y Cu no arsenical (figura 59).

**Figura 59** *Razon Cu/As en El Brocal*



*Nota.* Elaborada por el autor

Cobre arsenical: Se emplaza en las Brechas Mineralizadas y Mantos Mineralizados del horizonte prospectivo, su potencia varía de decenas hasta más de 100 m. Se encuentra hospedado en secuencias de brechas calcáreas e hidrotermales, niveles volcanoclásticos, y dacitas porfiríticas, menor presencia en areniscas

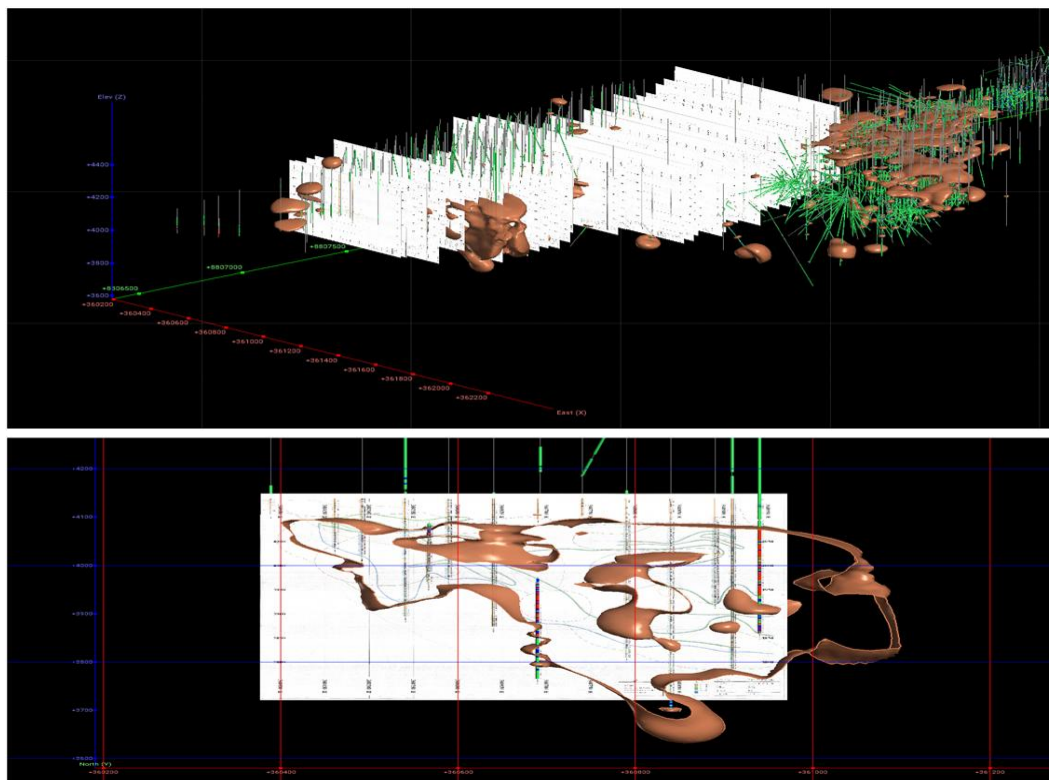
Cobre mixto: Denominamos también transicional, se encuentra también dentro del horizonte prospectivo; su potencia es variable, desde algunos metros a 30 m. Se hospeda en secuencias de brechas calcáreas e hidrotermales, dacitas y areniscas con fuerte silicificación; la mineralización está conformada por piritas semi masiva a masiva como un reemplazamiento parcial y total de matriz intercrecida con covelita y enargita fina de manera intersticial.

Cobre no arsenical: También llamado calcosítico, la mineralización de cobre bajo en arsénico se aloja principalmente en dacitas y areniscas. El ~60% de la mineralización conocida hasta el momento en Marcapunta Oeste está en los sills dacíticos endógenos. Estos se distribuyen espacialmente en el sistema de fallas en bloque E-O.

Con la discriminación del tipo de cobre en base a su relación con el arsénico, se realizaron secciones transversales EW de NS; alrededor Marcapunta, el criterio tomado para la realización se basó en los sondajes y el ratio que marcan estos, esta data fue

proporcionada por los geólogos de modelamiento y sección; se realizaron 38 secciones para la reinterpretación (figura 60).

**Figura 60** Modelamiento tridimensional para estimación

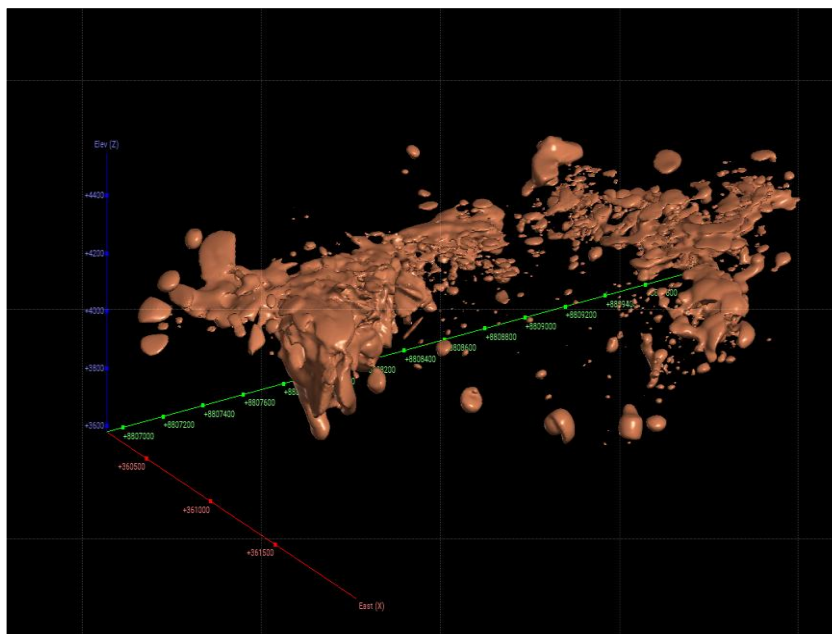


*Nota.* Elaborada por el autor

Con las secciones, los valores discretizados y el modelado numérico (kriging), se realizó un modelo de bloques con unas dimensiones de 5x5x2 y una composición de sondajes de 1 m, esto de acuerdo a las condiciones espaciales de los dominios geológicos. Este modelo se generó a partir de envoltente (figura 60) en base a la ley de corte del proyecto (cut off), que para este caso es de 5 ppm para el ratio Cu/As, estos envoltentes cumplen la función de delimitar las zonas mineralizadas (inside) con el objetivo de realizar la estimación y el modelo de bloques dentro del envoltente mineralizada (inside).

En la figura 61, se representa el resultado del modelo de bloques con la disposición de la envolvente del cuerpo mineralizado de acuerdo a la ley de corte y el dominio geológico favorables para la mineralización de cobre en relación al arsénico.

**Figura 61** Modelamiento tridimensional para estimación



*Nota.* Elaborada por el autor

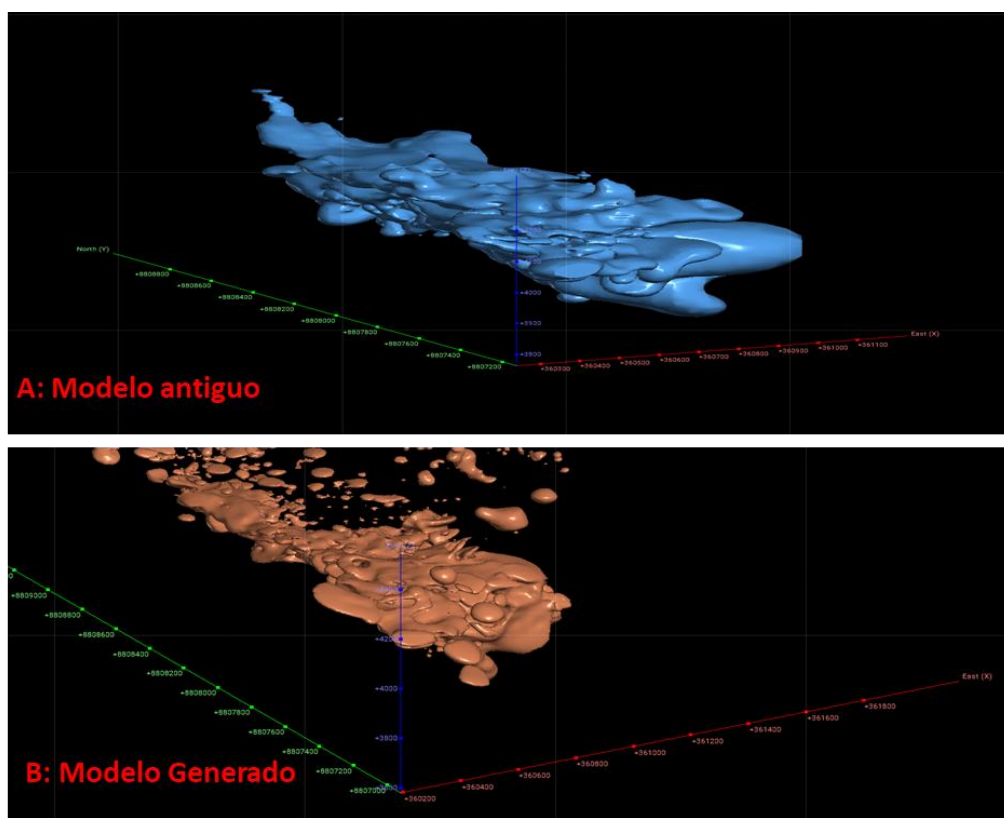
### ***Validación***

Para la validación del modelo generado, se realizó una comparativa del modelo del ratio Cu/As con el modelo de ley de Cu (figura 61), la configura geométrica de ambos es similar en cuanto a la orientación del cuerpo mineralizado con dirección general O-E.

Los tipos de cobre modelados, geológicamente se originaron por procesos hidrotermales y al ser el yacimiento de alta sulfuración se evidenciaron diversos eventos como una zona de enriquecimiento hipógeno lo que dio origen a estos tipos de Cu.

Con respecto al tonelaje, se recuperó 1,5 millones de toneladas que anteriormente estaban incluidas dentro del cobre mixto y calcosítico (figura 62).

**Figura 62 Modelamiento tridimensional comparativo**



Nota. Elaborada por el autor

**Figura 63 Recursos Cu Mixto**

Recursos Cu Mixto								
Recursos	Categorías	Tonelaje	Cu	Ag	Au	As	Fe	NSR
		Miles t	Pct	Oz/t	g/t	Pct	Pct	US\$/t
Mineral Cu	Medido	4,081	1.41	0.69	0.91	0.32	22.15	74.30
	Indicado	6,522	1.46	0.65	0.75	0.30	19.42	74.11
	Inferido	7,022	1.53	1.49	0.81	0.35	17.64	86.96
Recursos Cu Calcocita								
Recursos	Categorías	Tonelaje	Cu	Ag	Au	As	Fe	NSR
		Miles t	Pct	Oz/t	g/t	Pct	Pct	US\$/t
Mineral Cu	Medido	2,658	2.04	0.47	0.56	0.17	19.30	96.50
	Indicado	3,978	1.97	0.49	0.46	0.16	15.91	92.57
	Inferido	6,576	1.77	1.03	0.53	0.21	13.95	89.65
TOTAL		30,836						

Ore	Volume	Cu_pct	Ag_oz	Au_ppm	As_pct	nsr
ENVCU_2	1,567,699.23	531,103.62	1.25	0.84	0.63	0.27

Nota. Tabla elaborada por el autor con base en la estimación de recursos realizada en Leapfrog Geo. Los valores de tonelaje, leyes y volumen fueron generados a partir del modelo de bloques con parámetros de interpolación validados mediante variografía.

### **4.3. Prueba de hipótesis**

Dado que la investigación es de tipo aplicada y de nivel descriptivo, se verificó la hipótesis, pues se sustenta en el cumplimiento de los objetivos y en el análisis de los resultados obtenidos. A lo largo del modelamiento, el uso del ratio Cu/As permitió identificar con mayor claridad las zonas arsenicales, mixtas y no arsenicales, mejorando la precisión en la representación de los recursos del yacimiento. Esta información facilitó la interpretación del modelo y aportó bases más sólidas para la planificación minera, evidenciándose que el uso del Cu/As contribuye a una mejor estimación de recursos.

El análisis de los datos geológicos fue fundamental para comprender cómo se distribuyen el cobre y el arsénico dentro del yacimiento. Al comparar las litologías y estructuras con el comportamiento del Cu/As, se observó una clara coherencia entre ambos, lo que permitió definir zonas más estables para el modelamiento. Esto demuestra que la geología aporta información clave para mejorar la estimación, por lo que la hipótesis específica se cumple.

Las técnicas geoestadísticas empleadas como los variogramas, el análisis de anisotropías y el estudio de la continuidad espacial permitieron entender con detalle el comportamiento del Cu/As en profundidad y en superficie. Los resultados mostraron patrones consistentes que facilitaron la delimitación de dominios geoquímicos y geológicos. Gracias a esta claridad, se confirma que estas técnicas permiten delimitar adecuadamente las unidades necesarias para la estimación, validando la hipótesis correspondiente.

Definir correctamente los parámetros del modelo de bloques fue esencial para obtener un modelo más representativo. Al ajustar el tamaño del bloque, los parámetros de búsqueda y otros factores, se logró una estimación que reflejó de manera realista la

variabilidad del Cu/As. La comparación con los datos originales mostró coherencia y ausencia de sesgos relevantes, lo que confirma que estos parámetros sí mejoran la estimación de recursos.

El variograma y la varianza de Kriging permitieron evaluar de forma objetiva la continuidad y la incertidumbre del Cu/As en el depósito. Al usar estos elementos, se obtuvo un modelo más estable y confiable que el que se habría logrado sin técnicas geoestadísticas estructuradas. La disminución de la incertidumbre y la mejora en la interpretación espacial confirman la hipótesis que sostiene que estas herramientas aportan mejoras importantes al proceso de estimación.

La clasificación de los recursos basada en el Cu/As fue sometida a los criterios de confiabilidad establecidos por el informe JORC. La calidad del muestreo, el control de QA/QC y la coherencia del modelamiento cumplieron con lo requerido para considerar la estimación como confiable. Esto demuestra que la clasificación realizada con este enfoque es válida y cumple con los estándares técnicos, confirmando la aceptación de la hipótesis.

La validación del modelo de bloques, realizada mediante comparaciones entre datos estimados y reales, mostró que el modelo reproduce correctamente el comportamiento del Cu/As en el yacimiento. Los análisis de tendencia y los gráficos comparativos no evidenciaron sesgos importantes, lo que refleja que la estimación es precisa y consistente. Por lo tanto, la hipótesis que plantea mejoras frente a los datos observados se considera aceptada.

**Tabla 8** Validación del modelo geoestadístico

ID	SAMPFROM	SAMPTO	Cu (%)	As (%)	Ratio Cu/As Observado	Ratio Cu/As Estimado
1	0	2	2.35	0.56	4.20	4.51
2	2	4	1.98	0.42	4.71	4.32
3	4	6	2.12	0.51	4.16	4.62
4	6	8	2.47	0.57	4.33	4.02
5	8	10	1.95	0.48	4.06	4.21
6	10	12	2.04	0.47	4.34	4.11

*Nota:* Elaboración propia en base a resultados de laboratorio y modelamiento geoestadístico.

**Tabla 9** Resultados de prueba de hipótesis

Indicador	Valor	Interpretación breve
Número de datos (n)	500	Cantidad de pares observados–estimados analizados
Media de diferencias (Est – Obs)	0.005	Diferencia promedio prácticamente nula
Desviación estándar de las diferencias	0.497	Variabilidad baja en las diferencias
t calculada	0.036	Inferior al valor crítico, no significativa
t crítica ( $\alpha = 0.05$ , $gl = 499$ )	1.965	Punto de comparación para aceptar/rechazar $H_0$ (actualizado por $n=500$ )
Coefficiente de correlación (r)	0.898	Asociación lineal fuerte
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.807	El modelo explica el 80.7% de la variabilidad
Error absoluto medio (MAE)	0.381	Error promedio bajo
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0.480	Precisión aceptable en la estimación
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	9.83 %	Error relativo dentro de márgenes aceptables

*Nota:* Elaborado por el autor

En la Figura 43 se observa el gráfico de dispersión entre valores observados y estimados, con la línea de tendencia lineal, que evidencia la fuerte asociación entre ambos conjuntos de datos ( $R^2 \approx 0.81$ ).

Dado que el valor absoluto de la  $t$  calculada (0.036) es menor que el valor absoluto de la  $t$  crítica (1.965), se concluye que no existe una diferencia significativa entre los valores observados y los estimados del ratio Cu/As. Por lo tanto, la hipótesis planteada es aceptada.

#### **4.4. Discusión de resultados**

El proceso de modelamiento geoestadístico basado en el ratio Cu/As permitió validar de manera integral la consistencia de los datos, la variografía, la construcción del modelo de bloques y la clasificación de recursos conforme al estándar JORC.

##### **4.4.1. Procesamiento de Datos y Validación**

El análisis exploratorio de los datos de cobre y arsénico permitió establecer dominios arsenicales, mixtos y no arsenicales, lo que facilitó una delimitación más precisa del yacimiento. La validación del modelo, mediante la comparación de valores observados y estimados (Tabla 4 y Figura 43), mostró que no existen diferencias significativas entre ambos conjuntos de datos ( $t = 0.036 < t \text{ crítica} = 1.965$ ). La fuerte correlación ( $r = 0.898$ ;  $R^2 = 0.807$ ) y los errores bajos (MAE = 0.381; RMSE = 0.480; MAPE = 9.83%) confirman que la estimación es confiable y cumple lo planteado en el objetivo específico 6.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Herrera y Jorge (2019), quienes concluyeron que la aplicación de metodologías geoestadísticas, independientemente del software utilizado, genera resultados estadísticamente consistentes, reforzando la validez de la prueba de hipótesis aplicada en este estudio. Asimismo, el valor de  $R^2$  obtenido es comparable con lo señalado por Guía (2021) en Retamas, donde la geoestadística permitió reducir la varianza y mejorar la confiabilidad de los modelos de recursos.

#### **4.4.2. Variografía y Geoestadística Aplicada**

La variografía evidenció estructuras espaciales consistentes, con un nugget cercano a 0.6 y una meseta alrededor de 1, reflejando la adecuada continuidad espacial de los datos. Estos parámetros fueron incorporados en el modelo de bloques (5x5x2 m), interpolando leyes mediante Kriging ordinario y densidades de roca, lo que resultó en una representación tridimensional robusta del yacimiento.

Este hallazgo es coherente con lo descrito por Rivera (2023), quien al aplicar geoestadística en Milpo resaltó que la definición precisa de variogramas y parámetros del modelo de bloques incrementa la confiabilidad en la estimación de recursos y en la determinación del Cut-Off.

#### **4.4.3. Modelamiento Tridimensional**

El modelo de bloques tridimensional fue diseñado con dimensiones de 5x5x2 metros y composiciones ajustadas a intervalos de 1 metro. Este enfoque facilitó una representación detallada de las zonas mineralizadas y no mineralizadas, particularmente al establecer una ley de corte de 5 ppm para el ratio Cu/As. Los resultados reflejaron una coherencia espacial notable, con bloques claramente diferenciados en términos de potencial económico.

#### **4.4.4. Estimación y clasificación de recursos**

El modelo geoestadístico permitió identificar aproximadamente 1.5 Mt adicionales de recursos respecto a una modelación convencional, lo que demuestra el valor agregado de incluir el ratio Cu/As. Además, la clasificación bajo el código JORC permitió diferenciar recursos medidos, indicados e inferidos con criterios de confiabilidad adecuados, cumpliendo lo planteado en el objetivo específico 5.

Resultados similares fueron reportados por Ramos y Calderón (2022), quienes evidenciaron que la incorporación de variables geometalúrgicas en los procesos de

estimación permitió incrementar los recursos minerales hasta en un 20%, resaltando la importancia de integrar atributos geoquímicos y metalúrgicos en los modelos de bloques. De manera análoga, Álvarez y Lovera (2022) concluyeron que el uso de parámetros geoquímicos mejora significativamente la zonificación del yacimiento, lo cual coincide con los beneficios obtenidos en este estudio al emplear el ratio Cu/As.

#### **4.4.5. Impacto del Ratio Cu/As**

La incorporación del ratio Cu/As fue clave para zonificar el yacimiento en dominios arsenicales, mixtos y no arsenicales. Esta diferenciación no solo fortalece la estimación de recursos, sino que también aporta ventajas para la planificación minera al identificar zonas con material penalizado por contenido de arsénico.

De manera similar, Ramos y Calderón (2022) demostraron que la incorporación de variables geometalúrgicas y geoquímicas mejora la selectividad y la definición de zonas mineralizadas, incrementando incluso la estimación de recursos minerales. Estos hallazgos refuerzan lo observado en este estudio, particularmente en relación con la utilidad del ratio Cu/As para una zonificación más precisa del mineral.

#### **4.4.6. Distribución y Caracterización de los Recursos**

Los resultados mostraron una diferenciación clara entre los distintos tipos de mineralización:

- **Cobre Arsenical:** Asociado a brechas mineralizadas, con potencias superiores a 100 metros.
- **Cobre Mixto:** Ubicado en secuencias de dacitas y areniscas con silicificación intensa.
- **Cobre Bajo en Arsénico:** Mayoritariamente en sills dacíticos y areniscas, asociados a bloques estructurales con orientación este-oeste

## CONCLUSIONES

- Se logró realizar un análisis exploratorio completo de los datos geológicos provenientes de los sondajes y del área de estudio, aplicando técnicas de limpieza, normalización y corrección de errores. A través de histogramas, boxplots y diagramas de dispersión, se evidenció una tendencia no normal inicial en los datos del ratio Cu/As, la cual fue corregida mediante transformaciones estadísticas. La identificación litológica permitió diferenciar zonas ricas en enargita-pirita, con presencia significativa de cobre y arsénico, definiendo así dominios geoquímicamente coherentes. Esta caracterización geológica fue crucial para el modelamiento posterior y permitió establecer los fundamentos estructurales del yacimiento.
- La delimitación geológica se efectuó con base en la interpretación de los registros litológicos y su correspondencia con las zonas mineralizadas. Mediante el análisis estadístico de la distribución de Cu y As, se determinaron los umbrales de ley para la creación de dominios, utilizando histogramas normalizados. Estos dominios fueron representados en el modelo tridimensional, permitiendo una zonificación clara del yacimiento, diferenciando sectores de alta, media y baja ley de Cu/As. Esto permitió una mejor segmentación de los bloques de modelamiento y aseguró la precisión del proceso de estimación.
- Se definió un modelo de bloque con dimensiones de 5x5x2 metros, adecuado a la densidad de muestreo y al diseño geológico del yacimiento. Se utilizó una compositación de 1 metro para homogenizar las muestras, asegurando la representatividad estadística. Los variogramas omnidireccionales y direccionales mostraron continuidad espacial, con un rango promedio de 110 metros, un nugget de 0.6 y una meseta de 1, características propias de yacimientos estratiformes. Asimismo, se aplicó la interpolación por Kriging ordinario, empleando parámetros previamente

calibrados y validados con análisis de errores. Este modelamiento permitió definir con precisión la ley promedio del ratio Cu/As en cada bloque del yacimiento.

- El modelo de bloques final reportó:
- Que en conjunto, se lograron ~1.5 Mt adicionales de recuperación en comparación con modelos previos, gracias a la adecuada delimitación de dominios por Cu/As.
- La metodología de interpolación implementada (Kriging ordinario) permitió no solo estimar valores puntuales para el ratio Cu/As, sino también calcular su varianza asociada, lo que refleja el grado de incertidumbre de cada estimación. Los mapas de varianza generados evidenciaron zonas con mayor confiabilidad (cerca de los puntos de perforación) y otras con mayor incertidumbre (zonas periféricas), lo cual es clave para la toma de decisiones operativas. El análisis de variogramas mostró estructuras robustas y direcciones preferenciales de continuidad mineralógica, lo que validó el uso de esta técnica estadística como la más adecuada para este tipo de depósitos.
- Siguiendo las directrices del Código JORC, se realizó la clasificación de los recursos estimados en tres categorías: medidos, indicados e inferidos. Se cuantificaron aproximadamente 1.5 millones de toneladas en la categoría de recursos medidos, los cuales presentan alta certeza por su cercanía a los puntos de muestreo y baja varianza. Los recursos indicados corresponden a zonas intermedias con menor densidad de información, mientras que los recursos inferidos se ubican en sectores con menor control geológico. Esta clasificación cumple con los criterios de continuidad geológica, calidad de datos y densidad de información, asegurando así la confiabilidad técnica de la estimación realizada.
- La validación del modelo geoestadístico del ratio Cu/As demostró un comportamiento confiable y consistente. Los valores observados y estimados no mostraron diferencias

significativas ( $t = 0.036 < t \text{ crítica} = 2.145$ ), mientras que la fuerte correlación obtenida ( $r = 0.898$ ;  $R^2 = 0.807$ ) y los errores relativamente bajos ( $MAE = 0.381$ ;  $RMSE = 0.480$ ;  $MAPE \approx 9.83\%$ ) confirman la precisión del modelo. En conjunto, estos resultados evidencian que la estimación realizada a partir del ratio Cu/As cumple con los criterios de validación planteados en el objetivo.

## RECOMENDACIONES

- Es esencial que adoptemos protocolos más estrictos para el control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) desde el inicio de nuestras actividades de muestreo y preparación de datos. Esto significa que debemos utilizar estándares, duplicados y diagramas de dispersión para asegurarnos de que la información que recopilamos sea precisa y fácil de rastrear.
- Incorporar herramientas avanzadas, como las interpolaciones multivariadas y el análisis de dominios mediante Kriging co-regionalizado. Estas técnicas nos ayudarán a captar mejor la diversidad del yacimiento y a mejorar la precisión en nuestras estimaciones de leyes y tonelajes.
- Actualizar nuestros modelos de bloques tridimensionales de manera regular, utilizando datos de nuevas perforaciones y estudios geológicos. Esto nos permitirá mantener nuestras estimaciones alineadas con la realidad del yacimiento. A la par, debemos realizar una delimitación geológica precisa, aplicando técnicas de dilución para evitar inconsistencias en los resultados. Así, nos aseguramos de que los límites de los dominios sean representativos de la geología del área.
- La validación cruzada debe ser una práctica habitual en nuestro trabajo. Esto nos permitirá evaluar la precisión de nuestras estimaciones y reducir posibles sesgos en los resultados. Al hacerlo, aumentamos la confiabilidad de nuestros modelos y garantizamos que nuestras proyecciones se ajusten a las características reales del yacimiento.
- Integrar parámetros económicos, como el grado de corte (cut-off grade), en nuestro modelado para optimizar la viabilidad económica del proyecto. Además, analizar cómo el tamaño de los bloques influye en la extracción del mineral aprovechable puede ser muy beneficioso.

- Es fundamental que nuestro equipo técnico reciba capacitación continua en el uso de software especializado y en técnicas geoestadísticas avanzadas. Esto asegurará que todos manejemos adecuadamente las herramientas y metodologías que utilizamos en el proyecto. Al mismo tiempo, debemos llevar a cabo estudios detallados sobre el impacto ambiental de la explotación en áreas con alta concentración de arsénico, diseñando estrategias sostenibles que minimicen los riesgos para el medio ambiente.
- La metodología que desarrollemos debería aplicarse en otros proyectos mineros con características similares, para validar su efectividad en diferentes contextos geológicos y económicos.
- Explorar tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, que podrían optimizar nuestros análisis geoestadísticos y reducir significativamente el tiempo que necesitamos para procesar e interpretar grandes volúmenes de datos complejos. Estas acciones no solo garantizarán la sostenibilidad, sino que también contribuirán al éxito de nuestros futuros proyectos mineros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación* (3ra edición ed.). Bogotá, Colombia: Pearson Educación de Colombia Ltda.
- Canadian Securities Administrators. (2020). *Review of Mineral Resource Estimates in Technical Reports*. Canadá: CSA Staff Notice 43-311. Obtenido de <https://lautorite.qc.ca/fileadmin/lautorite/reglementation/valeurs-mobilieres/0-avis-acvm-staff/2020/2020juin04-43-311-avis-acvm-en.pdf>
- Consejo Minero. (Septiembre de 2023). *Cifras actualizadas de la minería*. Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/09/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2023-Septiembre.pdf>
- Cortés, M., & Iglesias, M. (2004). *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*. Mexico: Universidad Autónoma del Carmen. Obtenido de [https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia\\_investigacion.pdf](https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf)
- Cruz, E. (15 de Febrero de 2024). *El Brocal reportó una producción récord de cobre con 57.707 TMF en 2023*. Obtenido de <https://www.rumbominero.com/peru/el-brocal-produccion-record-de-cobre-2023/>
- Duke, J., & Hanna, P. (2014). Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation. *The AusIMM Guide to Good Practice*, 145-153. Obtenido de <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-mineralresourceandorereserveestimation.pdf>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2011). *Metodología de la Investigación*. Colombia: McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. de C.V. Obtenido de [https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n\\_Sampieri.pdf](https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf)

- Maldonado, C., & Mayorga, J. (2022). Influencia y efectos de la dimensión espacial del soporte en la estimación de recursos minerales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 25(49), 21-29. doi:<https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.23024>
- Minera El Brocal S.A.A. (2024). *MARCAPUNTA OESTE*. Obtenido de <https://www.elbrocal.pe/exploraciones.html>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Revista estadística "en cifras". *Reporte mensual*, 1-28. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4560999/Estad%C3%ADstica%20Subsector%20Miner%C3%ADa%20febrero%202023.pdf>
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2018). *Metología de la investigación: Cuantitativa-Cualitativa y redacción de la tesis*. Bogotá: Ediciones de la U. Obtenido de [http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales\\_de\\_consulta/Drogas\\_de\\_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf](http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf)
- Poniewierski, J. (Julio de 2019). Block model knowledge for mining engineers – an introduction. *Deswik*, 4-33. Obtenido de <https://www.deswik.com/wp-content/uploads/2019/07/Block-model-knowledge-for-mining-engineers-An-introduction.pdf>
- Sulistiyana, W., & Ali Amri, N. (2016). Mineral resources estimation based on block modeling. *American Institute of Physics*, 2-8. doi:<https://doi.org/10.1063/1.4940249>
- Torres, P. (22 de Febrero de 2022). *Memoria anual 2021 Sociedad Minera El Brocal s.a.a.* Obtenido de <https://www.smv.gob.pe/ConsultasP8/temp/Borrador%20Memoria%20SMEB%202021.pdf>

## **ANEXOS**

**Instrumentos de Recolección de datos**

**Procedimiento de validación y confiabilidad**

**Anexo 1. Propuesta de Instrumento**

**SOCIEDAD MINERA EL BROCAL**

Operador: _____ _____	Inversionista: _____ _____	Departamento: _____ _____	Provincia: _____ _____
Distrito: _____ _____	Descripción del proyecto: _____ _____	Tipo de yacimiento: _____ _____	Tipo de mineralización: _____ _____

**1. Dimensión: Análisis exploratorio y geológico de datos y geología**

Indicador(es)	Escalas / Variables Geológicas	Observaciones

**2. Dimensión: Metodología de modelización de dominios**

Indicador(es)	Escalas / Variables Geológicas	Observaciones

### 3. Dimensión: Parámetros del modelo de bloque

Indicador(es)	Escalas / Variables Geológicas	Observaciones

### 4. Dimensión: Metodología de interpolación

Indicador(es)	Escalas / Variables Geológicas	Observaciones

### 5. Dimensión: Clasificación de recursos minerales

Indicador(es)	Escalas / Variables Geológicas	Observaciones

**6. Dimensión: Validación del modelado de recursos minerales**

Indicador(es)	Escala / Variables Geológicas	Observaciones

Observaciones generales:

---

---

---

Anexo 2. Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA	MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p><b>Problema General:</b></p> <p>¿Cómo desarrollar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?</p>	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Desarrollar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>Al utilizar el ratio Cu/As en el modelamiento de recursos minerales, se mejor la precisión de la estimación y la planificación minera en la Sociedad Minera El Brocal durante el año 2024.</p>	<p><b>Variable 1</b></p> <p>Modelamiento de recursos minerales</p> <p><b>Variables 2</b></p> <p>Estimación de recursos minerales</p>	<p><b>Tipo de Investigación:</b></p> <p>Aplicada</p> <p><b>Enfoque de investigación:</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b></p> <p>Descriptivo</p> <p><b>Método General:</b></p> <p>Método científico</p> <p><b>Diseño:</b></p>	<p><b>Población:</b></p> <p>Sociedad Minera el Brocal, tanto las Unidades Mineras de Colquijirca y la Planta Concentradora de Huaraucaca</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>Unidad Minera de Colquijirca</p> <p><b>Muestreo:</b></p>	<p><b>Técnicas:</b></p> <p>Observación</p> <p>Recopilación documental</p> <p><b>Instrumentos:</b></p> <p>Ficha de investigación</p>
<p><b>Problemas Específicos:</b></p> <p>¿Cómo realizar el análisis exploratorio y</p>	<p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <p>Analizar datos geológicos para modelar y estimar recursos</p>	<p><b>Hipótesis Específica</b></p> <p>El análisis de los datos geológicos contribuye de manera</p>				

<p>geológico de datos y geología para el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?</p>	<p>minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.</p>	<p>significativa al modelamiento y estimación de recursos en función del ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal.</p>		<p>No-experimental</p>	<p>Muestreo no probabilístico del tipo intencional.</p>	
<p>¿Qué metodología de modelización de dominios permite realizar el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?</p>	<p>Delimitar unidades geológicas mediante geoestadística para estimar recursos según el ratio Cu/As en El Brocal, 2024</p>	<p>La aplicación de técnicas geoestadísticas permite delimitar adecuadamente las unidades geológicas necesarias para mejorar la estimación de recursos basada en el ratio Cu/As.</p>				

<p>¿Cuáles son los parámetros del modelo de bloque para el modelamiento y estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?</p>	<p>Definir parámetros del modelo de bloques (soporte, coordenadas, variograma, continuidad y leyes interpoladas como Kriging y densidad de roca) para estimar recursos minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024</p>	<p>La definición de los parámetros del modelo de bloques mejora la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en la Sociedad Minera El Brocal.</p>				
<p>¿Cómo es la metodología de interpolación en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en</p>	<p>Calcular la varianza de Kriging y el variograma para estimar recursos minerales según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.</p>	<p>El cálculo de la varianza de Kriging y del variograma aporta mejoras significativas en la estimación de recursos utilizando el ratio Cu/As.</p>				

Sociedad Minera El Brocal, 2024?						
¿Cómo se clasifican los recursos minerales en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024?	Clasificar los recursos minerales según el modelo estimado del ratio Cu/As, conforme al informe JORC en Sociedad Minera El Brocal, 2024	La clasificación de los recursos minerales en función del ratio Cu/As cumple con los criterios de confiabilidad establecidos por el informe JORC.				
¿De qué manera se realiza la validación del modelado de recursos minerales en el modelamiento y en la estimación de recursos minerales en base al ratio Cu/As en	Validar el modelo y la estimación de recursos según el ratio Cu/As en Sociedad Minera El Brocal, 2024.	f. La validación del modelo de bloques y de la estimación de recursos basada en el ratio Cu/As evidencia mejoras significativas respecto a los datos reales observados.				

Sociedad Minera El Brocal, 2024?						
-------------------------------------	--	--	--	--	--	--