

Aplicación de la geoestadística en el software Datamine para la estimación de leyes de Minerales de un yacimiento metálico

Frank del Piero, Dávila Huamán, Vilchez Calla¹, Erlita Mariceli, Vilchez Calla²
^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, N00336634@upn.pe, erlita.vilchez@upn.pe.

Resumen– Este proyecto aplica técnicas geoestadísticas, como Kriging ordinario y el método inverso a la distancia, utilizando el software Datamine para estimar las leyes de mineral de un yacimiento metálico y optimizar el Plan de Minado Óptimo (PIT). La investigación es aplicada, con un enfoque descriptivo que detalla las características y distribución de las leyes de mineral en el yacimiento, sin manipular variables. Los análisis geoestadísticos, incluidos los variogramas del cobre y arsénico, han permitido una interpretación precisa de su distribución espacial, mejorando la evaluación de la rentabilidad del proyecto. La distribución de 8,711 muestras de arsénico muestra concentraciones bajas con algunas anomalías significativas, mientras que el cobre presenta concentraciones moderadas. Los variogramas del cobre (0.027) y arsénico (3.1) facilitan la comprensión de su comportamiento y variabilidad, lo que contribuye a optimizar la toma de decisiones para la explotación minera. El diseño detallado de la mina, que incluye el pit, rampas de acceso, botadero y vías de circulación, asegura una operación eficiente y rentable. La metodología geoestadística aplicada permite estimaciones precisas de las leyes de mineral, lo que optimiza el diseño y la ejecución de la explotación minera, minimizando riesgos y maximizando la rentabilidad del proyecto. En conclusión, el uso del software datamine y la geoestadística ha sido esencial para el éxito de la estimación de leyes, la planificación del minado y la optimización de los recursos minerales, permitiendo un aprovechamiento más eficiente y rentable del yacimiento.

Palabras clave– geoestadística, estimación de leyes, datamine..

I. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de las leyes de mineral en un yacimiento minero es esencial para optimizar la planificación de la producción, mejorar la toma de decisiones económicas y gestionar eficientemente los recursos. Sin embargo, la variabilidad espacial de las muestras recolectadas en el yacimiento dificulta predecir con exactitud la distribución de las leyes de mineral en áreas no muestreadas, generando incertidumbre que puede resultar en pérdidas económicas por subestimación o sobreestimación de los recursos. El uso de herramientas geoestadísticas avanzadas, como las ofrecidas por el software datamine, es fundamental para obtener estimaciones más precisas de las leyes de mineral, lo que optimiza las operaciones mineras y minimiza los riesgos financieros. El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo de bloques basado en la estimación de leyes de un yacimiento minero utilizando técnicas

geoestadísticas aplicadas en datamine, con el propósito de mejorar la explotación y la toma de decisiones operativas y económicas. Este enfoque permitirá generar un modelo más detallado y realista de la distribución del mineral, lo que contribuirá a aumentar la eficiencia de la explotación, reducir los desperdicios y maximizar la rentabilidad del proyecto, al mismo tiempo que se mejora la evaluación de los riesgos asociados y la toma de decisiones estratégicas.

Rojas [1] en su investigación “Evaluación geoestadística del cuerpo mineralizado Karol - Mina Raura.” tuvo como objetivo conocer el comportamiento geoestadístico de la mineralización del cuerpo Karol en la Mina Raura para establecer la estimación de recursos. Se determinó que las zonas favorables para la mineralización están asociadas con los contactos metasomáticos entre calizas e intrusivos pórfidos cuarcíferos, presentando leyes significativas de Ag, Zn, Pb y Cu, además del control estructural de la mineralización. Se realizó un análisis de las características geológicas del cuerpo Karol y los controles geológicos de mineralización para poder estimar los recursos. La estimación de recursos se llevó a cabo utilizando métodos geoestadísticos, en los cuales se realizaron una serie de procesos para obtener los parámetros de entrada necesarios para la estimación de recursos.

De forma similar, Tito [2] en su estudio titulado “Estimación de recursos mineros por el método geoestadístico del sistema de vetas vicente en la unidad minera san Rafael-Minsur, Puno” su objetivo fue estimar los recursos minerales del yacimiento San Rafael utilizando el método geoestadístico del sistema de vetas Vicente, aplicando geología y geoestadística según el código JORC y la norma NI 43-101. La metodología fue descriptiva, analítica y propositiva, empleando el software datamine y datos de perforación diamantina y canales de muestreo. Se utilizó Kriging ordinario, vecino más cercano e inverso a la distancia al cuadrado para validar los resultados. Los recursos estimados fueron: 2,444,444 toneladas con 2.34% Sn (medidos), 1,311,827 toneladas con 0.96% Sn (indicados) y 350,869 toneladas con 0.51% Sn (inferidos). En conclusión, las técnicas geoestadísticas permitieron estimar con precisión los recursos minerales, contribuyendo a la optimización de la explotación minera.

De forma similar, Mamani [3] en su estudio denominado "Proceso de estimación de recursos minerales y aplicación de los métodos geoestadísticos aplicado en los cuerpos mineralizados 1, 2 y 5 en la unidad Cerro Lindo" tuvo como objetivo estimar los recursos minerales del yacimiento Cerro Lindo utilizando métodos geoestadísticos, considerando la variabilidad y correlación espacial de los datos. Se emplearon técnicas como kriging, inverso de la distancia y método poligonal, utilizando el software datamine para modelar los recursos minerales. Se aplicaron procedimientos de control de calidad (QA/QC) para asegurar la fiabilidad de los resultados. Los resultados mostraron que el kriging fue el método más efectivo, produciendo estimaciones coherentes con la geología del yacimiento. La calidad del modelo mejoró con la disponibilidad de suficientes datos, lo que permitió inferir correctamente las relaciones espaciales de las variables. En conclusión, el uso de técnicas geoestadísticas avanzadas permitió una estimación precisa de los recursos minerales, destacando la importancia de un modelo geológico conceptual sólido y sugiriendo que las perforaciones adicionales deben evaluarse cuidadosamente debido a los costos involucrados.

Por su parte, Gómez [4] en su estudio mencionado como "Determinación de la influencia del tamaño de la unidad de selección minera en la exactitud y precisión de la estimación de los recursos del Yacimiento "Mariel", la meta de este estudio fue analizar la influencia del tamaño de la unidad de selección minera (USM) en la precisión y exactitud de la estimación de recursos minerales, un tema crucial en la industria geológica-minera. Se evidenció que el desarrollo de sistemas automatizados ha mejorado la calidad de las estimaciones en diversos tipos de yacimientos. La investigación propone una metodología que combina estimación y simulación geoestadística para obtener valores reales, realizar estimaciones locales y globales, y comparar diferencias a través de error medio, error medio porcentual y error cuadrático medio. Se aplicó este procedimiento al yacimiento para cemento Mariel, demostrando que el tamaño de la USM influye significativamente en las estimaciones. Se encontró que, con una USM de 25x25x10 m, los valores de error son mínimos, lo que coincide con la mitad de la red de exploración. Los resultados permiten recomendar este tamaño de USM para futuros estudios similares.

Por su parte, Tolentino[5] en su investigación titulada "Estimación de recursos y reservas con el uso de software minero para la explotación del proyecto minero - Don Javier. " El objetivo del estudio fue estimar los recursos y reservas del yacimiento polimetálico utilizando herramientas informáticas y modelos geoestadísticos, con el fin de optimizar la planificación minera y la viabilidad del proyecto. Se utilizó un plano topográfico del yacimiento y datos de 505 taladros, que incluían tablas con coordenadas, dirección de los taladros y leyes de Cobre y Molibdeno. Estos datos fueron importados al software, validados y visualizados en 3D para crear un modelo de bloques de recursos utilizando el método de kriging ordinario. Se codificaron los bloques según su confiabilidad (medido, indicado e inferido) y se valorizó cada

bloque con los precios de los metales en el mercado internacional. Con esta información, se determinó la ley de corte para el Cobre (0.0786%) y se realizó la estimación de reservas mediante la creación de un pit óptimo utilizando minesight (MSOPIT). Finalmente, se generaron los reportes de recursos y reservas, considerando precios de metales, costos de minado y el beneficio total de la extracción del mineral en el pit óptimo.

Con base en lo expuesto, la pregunta de investigación que guía este estudio es: ¿Cuál es el impacto de la aplicación de técnicas geoestadísticas en datamine en la precisión de la estimación de las leyes de minerales en un yacimiento metálico?

Este proyecto se enfoca en la aplicación de técnicas geoestadísticas avanzadas, como kriging ordinario y el método inverso a la distancia, utilizando el software datamine para estimar las leyes de mineral de un yacimiento metálico. Esta metodología optimiza la planificación minera y mejora la toma de decisiones operativas y económicas, lo que se traduce en una maximización de la rentabilidad del proyecto. Al aplicar estas técnicas, se logra una estimación más precisa y detallada de las leyes de mineral, lo que reduce la incertidumbre y mejora la eficiencia en la explotación minera. Además, la optimización de los recursos y la explotación eficiente del yacimiento favorece el desarrollo económico local, genera empleo y promueve prácticas sostenibles, lo que beneficia tanto a la comunidad como al medio ambiente.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

Es aplicada, ya que busca generar un impacto práctico en la optimización de la explotación minera mediante la estimación de leyes de mineral usando técnicas geoestadísticas [6].

B. Diseño de investigación

El diseño es no experimental y de corte transversal, ya que se recolectan datos del yacimiento en un momento específico sin manipular variables [6].

C. Nivel de investigación

Es descriptivo, ya que se centra en detallar la distribución y estructura de las leyes de mineral en los puntos de muestreo, sin investigar relaciones causales [6].

D. Población

La población está constituida por todas las muestras de mineral extraídas del yacimiento, que incluyen datos geológicos y geoquímicos. Estas muestras representan el material mineral que se encuentra disponible para la estimación de leyes de mineral dentro del área de estudio del yacimiento.

E. Muestra

La muestra se seleccionó de manera representativa, eligiendo puntos de muestreo que reflejan la variabilidad mineralógica del yacimiento. Esta selección se basa en la diversidad de las características del mineral en diferentes ubicaciones dentro del yacimiento, garantizando que los datos

recolectados sean representativos del conjunto total de minerales presentes.

F. Muestreo

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando puntos de muestreo según la accesibilidad y disponibilidad de los mismos dentro del yacimiento. Este tipo de muestreo se utilizó debido a las limitaciones logísticas y a la necesidad de obtener datos específicos de áreas representativas sin recurrir a un proceso de aleatorización formal.

G. Instrumentos y materiales

Para este estudio, el principal instrumento es el software datamine RM, utilizado para modelar y estimar los recursos minerales mediante técnicas geoestadísticas como kriging. Este software es esencial para procesar grandes volúmenes de datos y realizar estimaciones precisas de leyes de mineral [7]. Las computadoras de alto rendimiento son necesarias para ejecutar el software de manera eficiente, procesando datos complejos y generando modelos 3D [8].

Se requieren estudiantes capacitados en minería y geoestadística para realizar la recolección y análisis de datos correctamente [9].

Instrumentos adicionales incluyen:

- GPS para asegurar la ubicación precisa de los puntos de muestreo [10]
- Programas de análisis estadístico para crear variogramas y evaluar la correlación espacial de los datos [11]
- Técnicas de interpolación (kriging) para estimar las leyes de mineral en áreas no muestreadas[12].

H. Procedimiento:

Se importaron y validaron los datos de taladros para asegurar precisión, seguido de la creación de una leyenda que permitió identificar zonas de óxido y sulfuro. Posteriormente, se generaron polígonos para construir un modelo 3D del yacimiento y desarrollar un modelo de bloques basado en la mineralización. Se visualizaron los sondeos en vista planar para verificar la cobertura, mientras se realizaron análisis estadísticos para definir intervalos de composición. Finalmente, se aplicaron métodos de interpolación, como kriging ordinario(KO) e inverso a la distancia(ID), y se diseñó el pit, rampa, botadero y vías de acceso.

I. Consideraciones éticas

El estudio respetó los principios éticos en la recopilación, manejo y divulgación de datos, asegurando la confidencialidad y el consentimiento adecuado para el uso de la información proveniente del yacimiento. Se cumplieron las normativas legales y ambientales correspondientes a la minería. Además, se siguió el formato de citación y referencia según las directrices de la

APA 7ª edición para asegurar la integridad académica y la correcta atribución de fuentes.

J. Limitaciones

El estudio enfrentó limitaciones debido a la disponibilidad limitada de datos geológicos, sesgos en la selección de la muestra y dificultades para acceder a información actualizada por restricciones de licencias y cambios en las muestras seleccionadas por los geólogos.

III. RESULTADOS

En la fig. 1 se presenta la sección más relevante del yacimiento, correspondiente a la sección 9. En esta sección se observa su leyenda, donde predominan las leyes bajas, aunque también se identifican áreas con leyes altas. Tras un análisis detallado, se puede concluir que el yacimiento muestra una distribución de leyes que varían entre bajas, semibajas, medias, semialtas y altas, destacándose principalmente por su presencia de leyes semibajas. Estos resultados permiten evaluar de manera más precisa la rentabilidad potencial del proyecto minero.

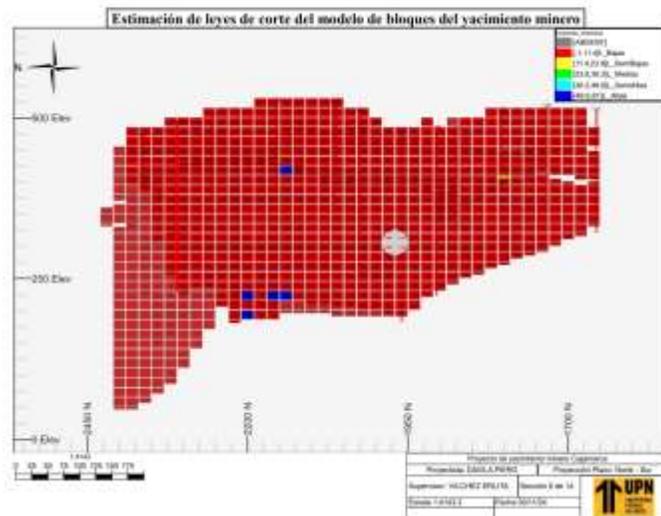


Fig. 1 Modelo de bloques.

La fig. 2 muestra los rangos de X, Y y Z, destacando la frecuencia de la distancia de corte, en la cual se resalta el variograma de Cu esférico con un valor de 0.027. Este análisis permite interpretar con mayor precisión la distribución espacial de las leyes de cobre dentro del yacimiento.



Fig. 2 Variograma del corte de leyes de cobre.

La fig. 3 presenta los rangos de X, Y y Z, resaltando la frecuencia de la distancia de corte, con un énfasis en el variograma de As esférico, que tiene un valor de 3.1. Este análisis facilita una interpretación más precisa de la distribución espacial de las leyes de arsénico en el yacimiento, mejorando la comprensión de su comportamiento y variabilidad.

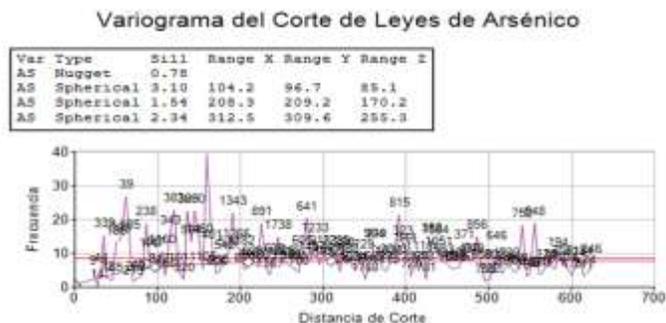


Fig. 3 Variograma del corte de leyes de Arsénico.

La fig. 4 presenta los rangos de X, Y y Z, resaltando la frecuencia de la distancia de corte, con un énfasis en el variograma de CUS esférico, que tiene un valor de 0.39. Este análisis facilita una interpretación más precisa de la distribución espacial de las leyes de arsénico en el yacimiento, mejorando la comprensión de su comportamiento y variabilidad.

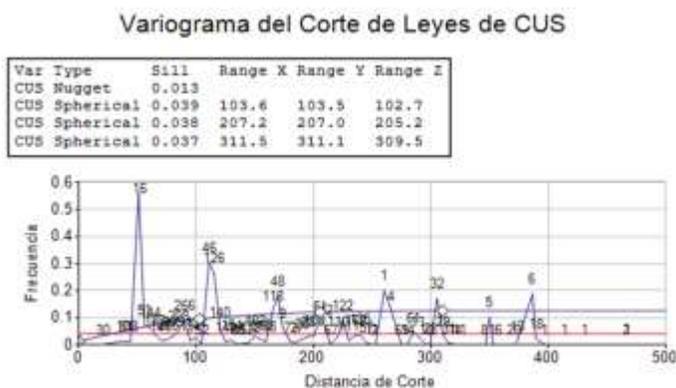


Fig. 4 Variograma del corte de leyes de CUS.

El histograma de la fig. 5 muestra la distribución de 8711 muestras de leyes de corte de arsénico, con una media de 1.677 ppm y una desviación estándar de 2.938. La mayoría de las muestras tienen valores bajos (cerca de 0 ppm), mientras que hay pocos valores elevados, hasta 47.355 ppm, generando una distribución asimétrica positiva. El valor mínimo de -1 ppm sugiere un posible error en los datos. La concentración predominantemente baja indica una zona con bajo contenido de arsénico, con algunas anomalías significativas que podrían requerir una revisión.

Histograma Ley de Corte Arsénico

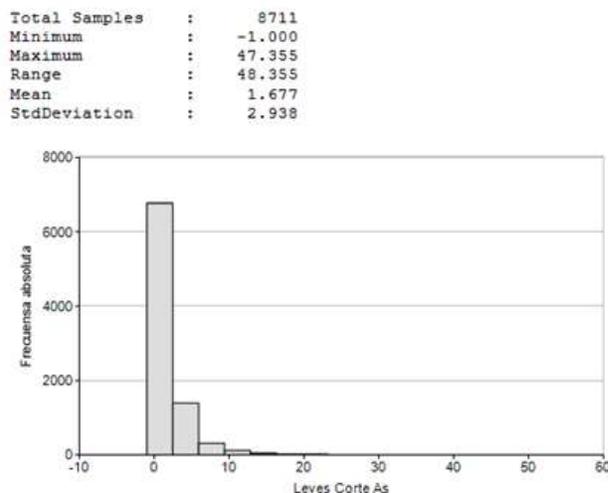


Figura 5 Histograma de la Ley de Corte de Arsénico.

El histograma de la fig. 6 muestra la distribución de 8711 muestras de leyes de corte de cobre y arsénico, con una media de 0.102 y una desviación estándar de 0.426. La mayoría de las muestras presentan valores cercanos a 0, indicando bajas concentraciones, con pocos valores extremos hasta 3.603, en una distribución asimétrica positiva. El valor mínimo de -1 sugiere un posible error de datos. La predominancia de valores bajos sugiere un entorno con baja concentración combinada de cobre y arsénico.

Histograma Leyes de Corte Cobre Y Arsénico

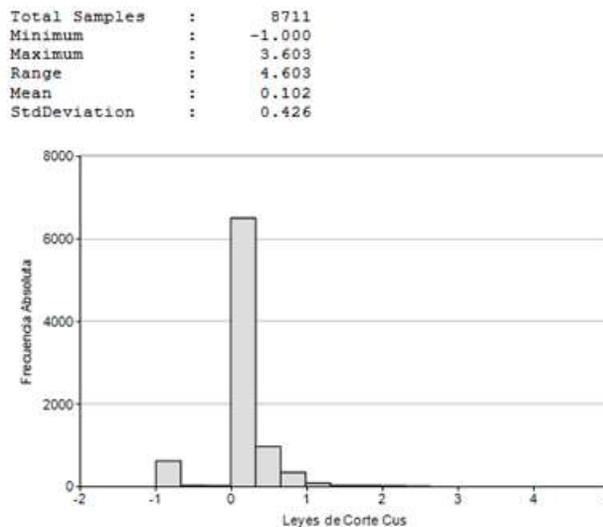


Fig. 6 Histograma de la Ley de Corte de Cobre y Arsénico.

El histograma de la fig. 7 muestra la distribución de 8711 muestras de leyes de corte de cobre, con una media de 0.350 y una desviación estándar de 0.369. La mayoría de las muestras presentan valores cercanos a 0.5, indicando una concentración moderada de cobre, con pocos valores elevados.

hasta 4.000. El valor mínimo de -1 sugiere un posible error en los datos. La distribución es asimétrica positiva, con predominancia de concentraciones bajas.

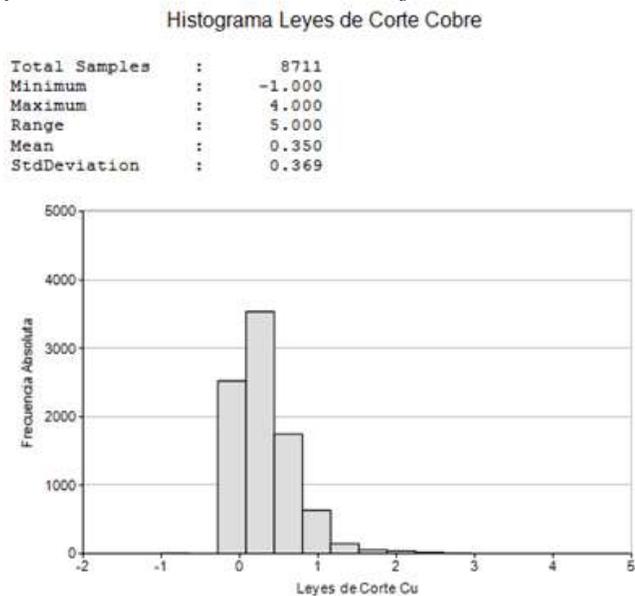


Fig. 7 Histograma de la Ley de Corte de Cobre.

La fig. 8 muestra el diseño detallado de la mina, donde se aprecian claramente el pit principal, las rampas de acceso, el botadero y las vías de circulación. Además, incluye una escala precisa y el correspondiente norte geológico, lo que facilita la orientación y la planificación minera. La distribución de los elementos sugiere un enfoque eficiente en la operación y logística dentro del yacimiento.



Fig.8 Diseño del Pit Óptimo aplicando Geoestadística.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A. Discusión

El análisis geoestadístico del yacimiento revela una distribución de leyes que varían desde bajas hasta altas, predominando las semibajas. Este patrón es coherente con los

hallazgos de Rojas [1], quien identificó que las zonas favorables para la mineralización en la Mina Raura están asociadas con contactos metasomáticos entre calizas e intrusivos pórfidos cuaríferos, presentando leyes significativas de Ag, Zn, Pb y Cu. Esta asociación geológica refuerza la importancia de considerar los controles estructurales en la estimación de recursos.

El variograma esférico del cobre presenta un valor de 0.027, facilitando una interpretación detallada de su distribución espacial. En contraste, el variograma del arsénico muestra un valor de 3.1, proporcionando una comprensión precisa de su comportamiento y variabilidad. Estos resultados son consistentes con los estudios de Tito [2], quien aplicó técnicas geoestadísticas para validar recursos en el sistema de vetas Vicente, y de Mamani [3], que concluyó que el Kriging produjo estimaciones coherentes en Cerro Lindo.

La distribución de 8,711 muestras de arsénico muestra una media de 1.677 ppm y una desviación estándar de 2.938. La concentración predominante es baja, aunque se identifican anomalías significativas. La distribución de las muestras de cobre y arsénico tiene una media de 0.102 y una desviación estándar de 0.426, predominando concentraciones bajas. Estos hallazgos respaldan la importancia de realizar un análisis detallado de la variabilidad espacial para una estimación precisa de los recursos.

El diseño detallado de la mina, que incluye el pit principal, rampas de acceso, botadero y vías de circulación, muestra un enfoque eficiente para la operación minera. Este diseño es coherente con las prácticas recomendadas por Tolentino [5], quien enfatizó la utilidad del software minero para estimar recursos en el proyecto Don Javier, optimizando la planificación minera y la viabilidad del proyecto.

B. Conclusiones

El uso del software datamine y la geoestadística ha permitido obtener estimaciones precisas sobre la distribución de las leyes en el yacimiento, con predominancia de leyes semibajas. Este enfoque mejora la evaluación de la rentabilidad potencial del proyecto minero.

Los análisis geoestadísticos del cobre y el arsénico han proporcionado una interpretación detallada de su distribución espacial. El variograma esférico del cobre (0.027) y del arsénico (3.1) facilitan una comprensión precisa de su comportamiento y variabilidad.

La distribución de las 8,711 muestras de arsénico muestra concentraciones bajas, con una media de 1.677 ppm, aunque se identifican algunas anomalías significativas. Las muestras de cobre presentan valores moderados, con una media de 0.350 y una desviación estándar de 0.369.

Finalmente, el diseño detallado de la mina, que incluye el pit principal, rampas de acceso, botadero y vías de circulación, garantiza una operación minera eficiente y rentable.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradezco profundamente a Jhon Stywart Ruiz Zamora por su invaluable apoyo a través de asesorías personalizadas, las cuales fueron fundamentales para el desarrollo metodológico del presente artículo científico. Su experiencia y orientación permitieron enriquecer significativamente el trabajo, contribuyendo de manera determinante a alcanzar los objetivos propuestos.

REFERENCIAS

- [1] S. Rojas Evaluación geoestadística del cuerpo mineralizado Karol - *Mina Raura*.2019.http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2186/1/T026_47066674_T.pdf
- [2] C. Tito. Estimación de recursos mineros por el método geoestadístico del sistema de vetas vicente en la unidad minera san Rafael-Minsur, Puno.2021.https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/16283/Tito_Mamani_Cesar_Augusto.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] L. Mamani . Proceso de estimación de recursos minerales y aplicación de los métodos geoestadísticos aplicado en los cuerpos mineralizados 1, 2 y 5 en la unidad Cerro Lindo.2020. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/1c61ae94-40e6-44b3-b6b3-514b27958c71>
- [4] O. Gómez. Determinación de la influencia del tamaño de la unidad de selección minera en la exactitud y precisión de la estimación de los recursos del Yacimiento "MARIEL". 2017. <https://rc.upr.edu.cu/bitstream/DICT/258/1/2007.3.10.u1.s2.t.pdf>
- [5] F. Tolentino. Estimación de recursos y reservas con el uso de software minero para la explotación del proyecto minero - DON JAVIER. 2019. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9008ae59-d8c9-4f12-a680-148b2d6705a3/content>
- [6] R. Hernández y C. Mendoza. Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.2018.
- [7] Datamine. (2020). *Datamine RM: User guide*.
- [8] G. Smith , R. Johnson, y L. Smithson. *Advanced computer applications in mining*.2019.
- [9] L. Taylor y P. Wilson . *Geoestadistics for mining: A practical guide*.2018.
- [10]S. Johnson, y D. Rowe. *GPS in mining*.2021.
- [11]G. Matheron. *Principles of geostatistics*.1963.
- [12]A. Journel y C. Huijbregts. *Mining geostatistics*..1978.