

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Reclasificación de blocks cubicados en la estimación de
recursos, basado en la identificación del cobre secundario**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Iomar Antony Sisniequez Villegas

 [0009-0004-6165-6369](https://orcid.org/0009-0004-6165-6369)

Asesor

M.Sc. Carlos Alberto Rojas Leon

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Sisnieguez Villegas [1]
Referencia/Reference	[1] I. Sisnieguez Villegas, <i>“Reclasificación de blocks cubcados en la estimación de recursos, basado en la identificación del cobre secundario”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Sisnieguez , 2025)
Referencia/Reference	Sisnieguez, I. (2025). <i>Reclasificación de blocks cubcados en la estimación de recursos, basado en la identificación del cobre secundario</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mi madre Rosa y a mi padre Rudor, por ser mi fuerza, mi
refugio y mi inspiración.*

*A mi abuelo Daniel, que desde el cielo sigue guiando mis
pasos.*

*A mis tías Betty y Maritza, cuyo amor y sacrificio me
abrieron las puertas para estudiar en la mejor universidad
del Perú.*

*Aunque no pude compartir este logro con ustedes, cada
página de esta tesis lleva su recuerdo, su fe en mí y todo mi
amor eterno.*

*Les dedico este trabajo con infinito amor, gratitud y la
promesa de honrar su legado en cada nuevo desafío que
enfrente.*

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Compañía Minera Santa Luisa, por brindarme la oportunidad de desarrollar esta tesis con su valiosa información y por contribuir de manera fundamental a mi formación como geólogo, no solo en el aspecto académico, sino también en el profesional y humano.

Mi especial gratitud al ingeniero David, por confiar en mí desde el inicio, por reconocer el potencial que tenía y por impulsarme a ser cada día un mejor geólogo.

Asimismo, agradezco sinceramente al asesor Matsukawa, con quien tuve el privilegio de realizar este estudio, y cuya guía, conocimiento y paciencia fueron claves para culminar este proyecto.

A todos ellos, gracias por ser parte esencial de este logro y de mi crecimiento profesional.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo reclasificar los bloques cubicados en la estimación de recursos del yacimiento Huanzalá, diferenciando entre cobre primario y cobre secundario con el fin de mejorar la caracterización del mineral, optimizar los procesos de recuperación de cobre (Cu) y evaluar el impacto económico derivado de la nueva clasificación mineralógica. Asimismo, se buscó determinar la influencia del tipo de mineralización en la selección de los métodos de tratamiento y estimar la reducción potencial de costos operativos asociados a la recuperación del metal. La metodología aplicada se basó en un modelo geométrico tradicional de cubicación de bloques, sustentado en el cálculo de áreas, volúmenes, densidades y leyes ponderadas, empleando información de perforaciones, muestreos y análisis químicos. Los datos fueron procesados y reestimados mediante AutoCAD, incorporando criterios de reclasificación mineralógica que permitieron identificar dominios con cobre primario y secundario. Los resultados evidenciaron que la presencia del cobre secundario se asocia directamente a la estructura de falla principal y a la alteración hidrotermal tipo shiroji, lo que confirma la existencia de un proceso de enriquecimiento supergénico posterior a la mineralización primaria, donde el cobre se redistribuyó y concentró en sectores fracturados y permeables. Esta condición ha generado una marcada heterogeneidad mineralógica y metalúrgica, donde el cobre primario, presente en sulfuros como la calcopirita, coexiste con minerales secundarios tales como calcocita, covelina, malaquita y crisocola, afectando las leyes locales y la eficiencia de recuperación metalúrgica. La reclasificación de bloques permitió mejorar la precisión del modelo de recursos, optimizar la estimación económica y definir estrategias de procesamiento diferenciadas. Finalmente, se determinó que la aplicación de un método adecuado para el cobre secundario podría incrementar la recuperación en un 25 %, equivalente a un beneficio económico aproximado de USD 2,1 millones, demostrando el impacto técnico y financiero de esta reevaluación.

Palabras clave — Cobre secundario, enriquecimiento supergénico, estimación de recursos.

Abstract

The present research aimed to reclassify the block model in the resource estimation of the Huanzalá deposit, distinguishing between primary and secondary copper, in order to improve ore characterization, optimize copper (Cu) recovery processes, and evaluate the economic impact derived from the new mineralogical classification. Additionally, the study sought to determine the influence of mineralization type on the selection of processing methods and estimate the potential reduction of operating costs associated with copper recovery. The applied methodology was based on a traditional geometric block modeling approach, supported by the calculation of areas, volumes, densities, and weighted grades, using data from drill holes, sampling, and chemical analyses. The data were processed and re-estimated using AutoCAD, incorporating mineralogical reclassification criteria that allowed for the identification of primary and secondary copper domains. The results showed that secondary copper is directly associated with the main fault structure and the hydrothermal alteration known as shiroji, confirming the presence of a supergene enrichment process subsequent to the primary mineralization, in which copper was redistributed and concentrated in fractured and permeable zones. This condition generated a marked mineralogical and metallurgical heterogeneity, where primary copper, mainly as chalcopyrite, coexists with secondary minerals such as chalcocite, covellite, malachite, and chrysocolla, affecting local grades and metallurgical recovery efficiency. The block reclassification improved the accuracy of the resource model, optimized the economic estimation, and defined differentiated processing strategies. Finally, it was determined that applying a proper process for secondary copper could increase recovery by approximately 25%, equivalent to an economic gain of about USD 2.1 million, demonstrating the technical and financial impact of this re-evaluation.

Keywords — Secondary copper, supergene enrichment, resource estimation.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	4
1.3.1 Hipótesis general	4
1.3.2 Hipótesis específicas.....	4
1.4 Variables	4
1.4.1 Variable Independiente	4
1.4.2 Variable dependiente	4
1.5 Antecedentes referenciales	6
1.5.1 Antecedentes internaciones	6
1.5.2 Antecedentes nacionales	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Fundamentos de la estimación de recursos minerales	11
2.1.2 Método tradicional de estimación geométrica por bloques	12
2.1.3 Conceptos de cobre primario y cobre secundario.....	15
2.1.4 Identificación y modelamiento del cobre secundario.....	17
2.1.5 Reclassificación de bloques en función del cobre secundario	19
2.1.6 Clasificación de recursos minerales según estándares internacionales.....	21
2.2 Marco conceptual.....	23

2.2.1	Cobre primario	23
2.2.2	Cobre secundario	24
2.2.3	Cubicación de bloques	24
2.2.4	Estimación de recursos	24
2.2.5	Reclasificación de blocks	24
2.2.6	Recurso mineral	24
2.2.7	Tratamiento metalúrgico	24
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		25
3.1	Unidad de estudio	25
3.1.1	Ubicación y accesibilidad	25
3.1.2	Geología regional	26
3.1.3	Geología local	31
3.1.4	Mineralización	37
3.2	Metodología de estimación	42
3.2.1	Medición y cálculo del área	43
3.2.2	Cálculo del volumen	43
3.2.3	Peso específico	44
3.2.4	Cálculo de la ley	45
3.3	Modelamiento de bloques	47
3.3.1	Cálculo de los blocks 379 y 380 de la V2T	47
3.3.2	Cálculo de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	50
3.3.3	Inventario de reservas y recursos	53
3.4	Modelamiento de bloques – cobre secundario	55
3.4.1	Cálculo de los blocks 379 y 380 de la V2T	55
3.4.2	Cálculo de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	58
3.4.3	Influencia de la presencia de la falla	61
3.4.4	Inventario de reservas y recursos	62
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		64

4.1	Análisis de variación de recursos	64
4.2	Análisis de tipo de tratamiento	65
4.3	Análisis de costos	66
4.4	Validación del modelo	68
	Conclusiones	69
	Recomendaciones	71
	Referencias bibliográficas	72
	Anexos	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 : Peso específico de los minerales	45
Tabla 3 : Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 379 y 380 de la V2T ...	48
Tabla 4 : Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 379 y 380 de la V2T	48
Tabla 5 : Cálculo del volumen de los blocks 379 y 380 de la V2T	49
Tabla 6 : Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 379 y 380 de la V2T.	49
Tabla 7 : Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	51
Tabla 8: Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	51
Tabla 9 : Cálculo del volumen de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	52
Tabla 10: Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P	52
Tabla 11: Inventario de reservas y recursos	54
Tabla 12: Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)	55
Tabla 13: Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)	56
Tabla 14: Cálculo del volumen de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)....	56
Tabla 15: Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)	57
Tabla 16: Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario).....	58
Tabla 17: Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario).....	59

Tabla 18: Cálculo del volumen de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario).....	59
Tabla 19: Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario)	60
Tabla 20: Inventario de reservas y recursos – cobre secundario	63
Tabla 21: Variación de recursos	64
Tabla 22: Comparación de recuperaciones estimadas.....	66

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Sección de estimación de recursos.....	2
Figura 2 : Área de investigación.....	2
Figura 3 : Mapa de ubicación de la mina Huanzala.....	26
Figura 4 : Plano geológico regional.....	31
Figura 5 : Formaciones geológicas pertenecientes al yacimiento Huanzala.....	33
Figura 6 : Intrusivos pertenecientes al yacimiento Huanzala.....	35
Figura 7 : Columna estratigráfica local	36
Figura 8 : Secuencia de mineralización.....	40
Figura 9 : Esfalerita de mina Huanzala	41
Figura 10: Galena de mina Huanzala.....	41
Figura 11: Calcopirita de mina Huanzala	42
Figura 12: Delimitación gráfica de cuerpos mineralizados y cálculo de áreas en secciones geológicas.....	46
Figura 13: Sección de los bloques 379 y 380 de la veta V2T	50
Figura 14: Sección de los bloques 517, 519 y 523 de la veta 1P	53
Figura 15: Sección de los bloques 379 y 380 de la veta V2T – cobre secundario	57
Figura 16: Sección de los bloques 517, 519 y 523 de la veta 1P – cobre secundario	60
Figura 17: Variación de recursos	65
Figura 18: Variación de costos por proceso de recuperación.....	67

Introducción

La estimación de recursos minerales constituye una de las etapas más críticas dentro del proceso de evaluación y explotación de un yacimiento minero, ya que permite cuantificar la cantidad y calidad del mineral disponible, así como establecer la base técnica y económica para la toma de decisiones en la planificación de la mina. En este contexto, la presente tesis titulada “Reclasificación de blocks cubicados en la estimación de recursos, basado en la identificación del cobre secundario” tiene como propósito analizar la influencia de la mineralogía del cobre en la precisión de los modelos de recursos, diferenciando entre cobre primario y secundario, a fin de optimizar la recuperación metalúrgica y reducir los costos operativos asociados.

La investigación se desarrolla en el yacimiento Huanzalá, donde la mineralización de cobre se presenta tanto en forma primaria, representada por sulfuros como la calcopirita, como en forma secundaria, correspondiente a minerales oxidados y carbonatados generados por procesos de enriquecimiento supergénico. Sin embargo, en las estimaciones previas, los bloques fueron cubicados sin distinguir entre ambos tipos de cobre, generando posibles sobrestimaciones o subestimaciones en las leyes, así como en la eficiencia de los procesos de tratamiento. Por ello, el trabajo propone una reclasificación de los bloques cubicados, sustentada en la identificación mineralógica y estructural del cobre secundario, incorporando variables geológicas y metalúrgicas al modelo de recursos.

El desarrollo de la tesis se estructura en cuatro capítulos principales.

El Capítulo I aborda la parte introductoria del trabajo, donde se presenta la descripción del problema de investigación, los objetivos generales y específicos, la hipótesis de trabajo, las variables involucradas y los antecedentes nacionales e internacionales relacionados con la estimación de recursos y la diferenciación mineralógica del cobre. Este capítulo permite contextualizar la importancia de la reclasificación de bloques y su impacto en la evaluación económica del yacimiento.

El Capítulo II comprende el marco teórico y conceptual, en el cual se desarrollan los fundamentos que sustentan la investigación. Se abordan los principios de la estimación de recursos minerales, el método tradicional de cubicación geométrica por bloques, los conceptos de cobre primario y secundario, los procedimientos de identificación y modelamiento del cobre secundario, así como la clasificación de recursos según estándares internacionales como JORC y NI 43-101. Finalmente, se presenta el marco conceptual que articula los términos técnicos empleados en la investigación.

El Capítulo III corresponde al desarrollo del trabajo de investigación y constituye la parte operativa de la tesis. En él se describe la unidad de estudio, incluyendo la ubicación, accesibilidad, geología regional y local, así como las características de la mineralización. Posteriormente, se detalla la metodología de estimación, que abarca la medición de áreas, cálculo de volúmenes, determinación de densidades, cálculo de leyes ponderadas y cubicación de bloques. Se desarrolla también el modelamiento de bloques correspondiente a las vetas V2T y V1P, mostrando los cálculos de volumen y tonelaje, y el inventario total de recursos. En una segunda etapa, se presenta el modelamiento considerando cobre secundario, donde se recalculan los mismos bloques bajo criterios mineralógicos diferenciados y se analiza la influencia de la falla y la alteración hidrotermal tipo shiroji en la redistribución del cobre.

Finalmente, el Capítulo IV comprende el análisis y discusión de resultados, en el que se comparan los valores obtenidos en ambas estimaciones (cobre primario y secundario), evaluando la variación de recursos, la selección de métodos de tratamiento y el impacto económico asociado a la recuperación del metal. Se demuestra que la correcta identificación del cobre secundario permite mejorar la precisión del modelo de recursos, aumentar la recuperación metalúrgica y reducir significativamente los costos de operación.

En conjunto, la tesis integra aspectos geológicos, estructurales, mineralógicos y económicos para ofrecer una visión integral de la reclasificación de bloques en la estimación de recursos, proponiendo una metodología aplicable a yacimientos con mineralización mixta que buscan optimizar su gestión técnica y económica.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

En el ámbito minero, la correcta caracterización del mineral constituye un factor crítico para el diseño de procesos metalúrgicos eficientes y la optimización de los costos operativos. La precisión en la identificación de las especies minerales presentes en un yacimiento no solo condiciona la selección del método de procesamiento, sino también la estimación económica del recurso.

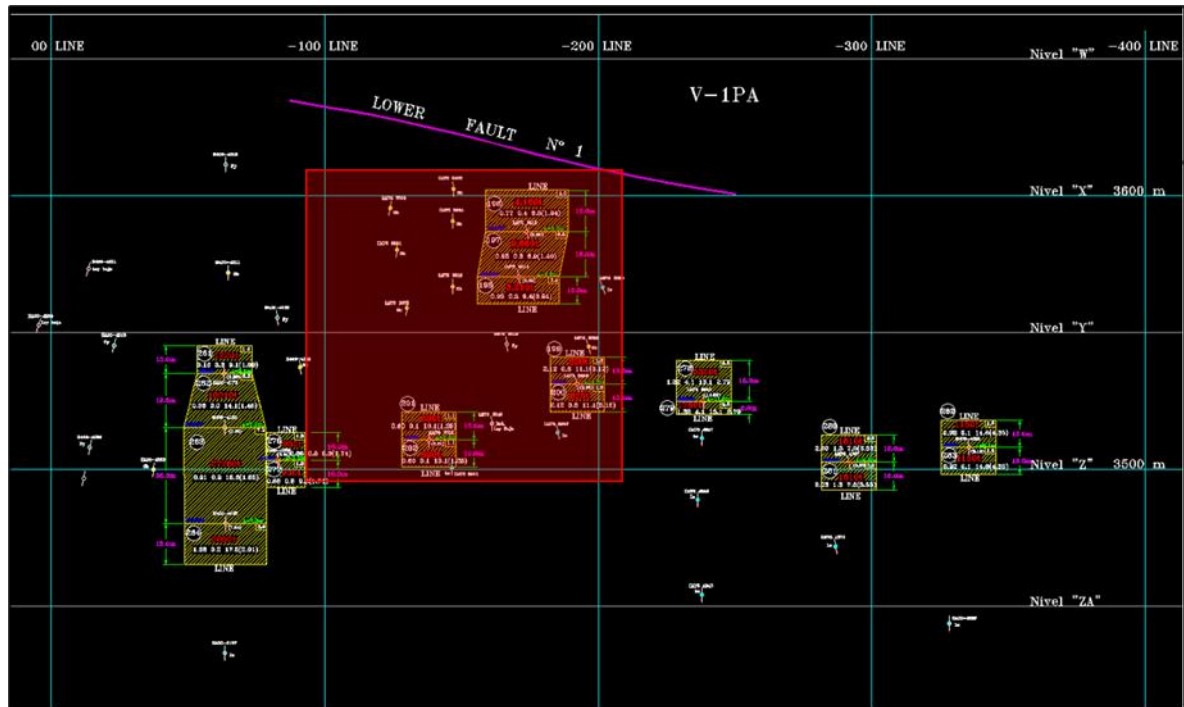
En una reciente estimación de recursos, los bloques del modelo geológico fueron cubiertos bajo la premisa de que el contenido metálico correspondía predominantemente a cobre primario. Sin embargo, estudios mineralógicos preliminares han revelado una presencia significativa de cobre secundario en varios de estos bloques. Esta discrepancia entre el supuesto inicial y la realidad mineralógica introduce una incertidumbre importante en la clasificación del mineral, afectando tanto la evaluación de los recursos como las decisiones operativas derivadas.

La ausencia de una adecuada diferenciación entre cobre primario y cobre secundario durante la etapa de estimación de recursos puede conducir a errores en la clasificación del material, generando la aplicación de procesos de tratamiento inadecuados, pérdida de eficiencia en la recuperación metalúrgica, e incluso distorsiones en los costos de operación.

En términos económicos, esta situación puede traducirse en la subvaloración o sobrevaloración del recurso, comprometiendo la rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

Figura 1

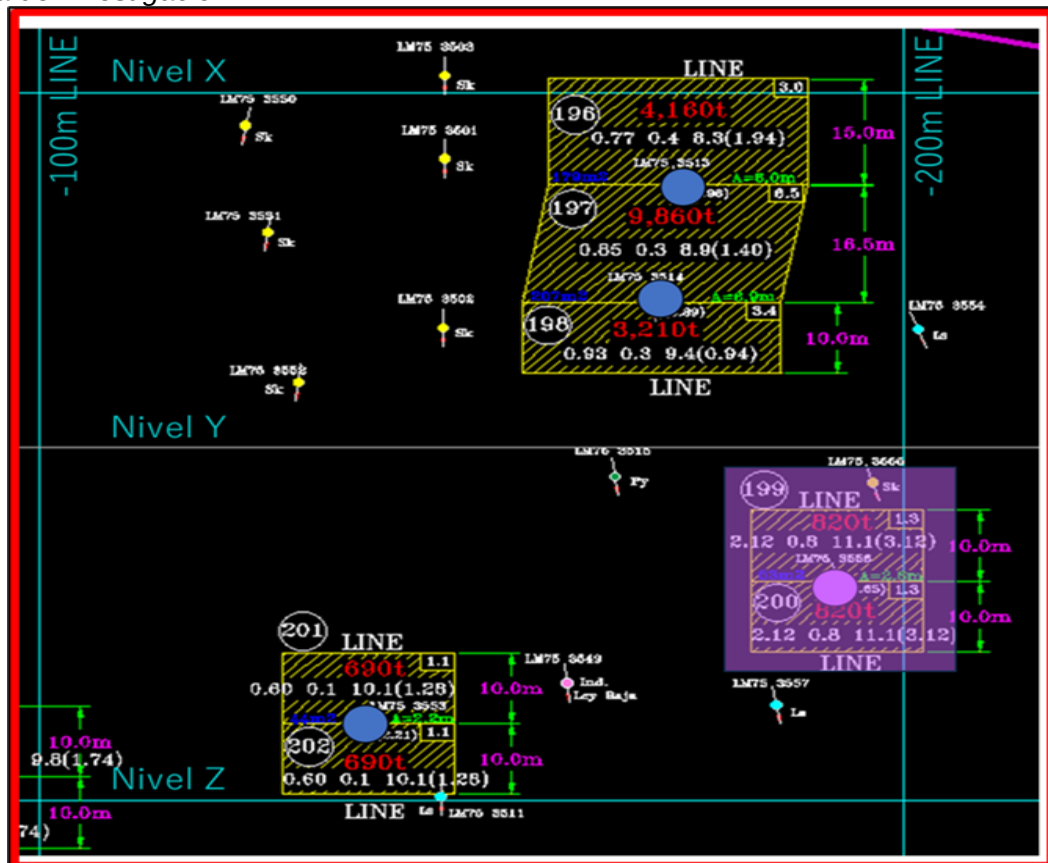
Sección de estimación de recursos



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

Figura 2

Área de investigación



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

En este contexto, surge la necesidad de reclasificar los blocks cubicados en función de la identificación precisa del cobre secundario, a través de un análisis mineralógico y geoquímico más detallado. Esta reclasificación permitirá reflejar con mayor exactitud la naturaleza real del cobre presente en el yacimiento, optimizando los modelos de estimación de recursos, los criterios de procesamiento metalúrgico y, en última instancia, la eficiencia económica del proyecto minero.

Con lo anterior descrito se plantean las siguientes interrogantes que serán respondidas en el desarrollo de la investigación.

Problema general:

¿Cómo influye la reclasificación los bloques cubicados en la estimación de recursos, para mejorar la caracterización del mineral y optimizar los procesos de recuperación de Cu?

Problemas específicos:

- ¿Cómo afecta en la selección del método de tratamiento de mineral, el impacto de la nueva clasificación mineralógica en el yacimiento?
- ¿Cómo afecta a la recuperación del cobre el impacto producido por la reducción potencial de costos económicos?

1.2 Objetivo

1.2.1 *Objetivo general*

Reclasificar los bloques cubicados en la estimación de recursos, diferenciando entre cobre primario y secundario, para mejorar la caracterización del mineral y optimizar los procesos de recuperación de Cu.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Evaluar el impacto asociado a la nueva clasificación mineralógica en la selección de métodos de tratamiento.
- Estimar la reducción potencial de costos económicos asociados en la recuperación de cobre.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

La identificación y reclasificación de los bloques cubicados según la presencia de cobre primario y secundario modificaría significativamente la distribución espacial de las categorías de recursos minerales: inferido, indicado y medido.

1.3.2 Hipótesis específicas

- La diferenciación entre cobre primario y secundario en la estimación de recursos influiría en la selección del método de tratamiento metalúrgico óptimo.
- La diferenciación entre cobre primario y secundario en la estimación de recursos influiría en la estimación de los costos de recuperación de cobre.

1.4 Variables

1.4.1 Variable Independiente

X: Bloques de Estimación de Recursos.

- Recurso Inferido.
- Recurso Indicado.
- Recurso Medido.

1.4.2 Variable dependiente

Y1: Caracterización del mineral.

- Tipo de Tratamiento del Mineral.

Y2: Recuperación del Cobre.

- KPIs de Costos.
- % Recuperación del Cu.

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general ¿Cómo influye la reclasificación los bloques cubicados en la estimación de recursos, para mejorar la caracterización del mineral y optimizar los procesos de recuperación de Cu?	Objetivo general Reclasificar los bloques cubicados en la estimación de recursos, diferenciando entre cobre primario y secundario, para mejorar la caracterización del mineral y optimizar los procesos de recuperación de Cu.	Hipótesis general La identificación y reclasificación de los bloques cubicados según la presencia de cobre primario y secundario modificaría significativamente la distribución espacial de las categorías de recursos minerales: inferido, indicado y medido.	X: Independiente / Causa Bloques de Estimación de Recursos	Recurso Inferido Recurso Indicado Recurso Medido	Tipo: Experimental Diseño: Cuantitativo Técnica: Análisis Geoestadístico
Problema específico 1 ¿Cómo afecta en la selección del método de tratamiento de mineral, el impacto de la nueva clasificación mineralógica en el yacimiento?	Objetivo específico 1 Evaluar el impacto asociado a la nueva clasificación mineralógica en la selección de métodos de tratamiento.	Hipótesis específica 1 La diferenciación entre cobre primario y secundario en la estimación de recursos influiría en la selección del método de tratamiento metalúrgico óptimo.	Y: Dependiente / Efecto Caracterización del mineral	Tipo de Tratamiento del Mineral	Instrumentos: Simulaciones Técnicas: Análisis Geoestadístico
Problema específico 2 ¿Cómo afecta a la recuperación del cobre el impacto producido por la reducción potencial de costos económicos?	Objetivo específico 2 Estimar la reducción potencial de costos económicos asociados en la recuperación de cobre.	Hipótesis específica 2 La diferenciación entre cobre primario y secundario en la estimación de recursos influiría en la estimación de los costos de recuperación de cobre.	Y: Dependiente / Efecto Recuperación del Cobre	KPIs de Costos % Recuperación del Cu	Instrumentos: Pruebas experimentales Técnicas: Análisis Económico

Nota: Fuente elaboración propia

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes internacionales

Copper Fox Metals Inc. (2020), en el informe técnico “Technical Report and Updated Resource Estimate for the Van Dyke Copper Project, Gila County, Arizona, U.S.A.”, desarrollaron una estimación de recursos enfocada en un depósito de cobre dominado por mineralización secundaria. El objetivo de este estudio fue determinar con precisión la distribución, tonelaje y ley de cobre presente en las zonas de óxidos y sulfuros secundarios, a fin de establecer un modelo de bloques representativo del potencial económico del yacimiento. La metodología empleada incluyó la recopilación y validación de datos de perforaciones históricas, definición de dominios geológicos asociados a procesos supergénicos, y la interpolación de leyes de cobre mediante técnicas de ponderación inversa en un modelo tridimensional de bloques. Los resultados indicaron que el depósito contenía aproximadamente 168 Mt con una ley promedio de 0.19 % CuT, predominando las especies secundarias como malaquita, azurita y crisocola. Los autores concluyeron que la mineralización secundaria tiene un impacto decisivo en la estimación del recurso, ya que condiciona los parámetros metalúrgicos y económicos; por ello, la delimitación y reclasificación de estos dominios resulta fundamental para mejorar la precisión y confiabilidad del modelo de recursos.

Coro Mining Corp / NCL Ingeniería y Construcción SpA (2020), en su informe técnico titulado “Updated and Expanded Resource Estimate for the Marimaca Copper Project, Antofagasta Province, Region II, Chile”, desarrollaron un modelo actualizado de estimación de recursos para un depósito de cobre dominado por mineralización secundaria y de óxidos. El objetivo principal del estudio fue cuantificar los recursos contenidos en las zonas de enriquecimiento supergénico y óxidos, diferenciándolos de los dominios primarios para optimizar los procesos de recuperación. La metodología aplicada consistió en la construcción de un modelo de bloques tridimensional, donde se definieron dominios mineralógicos basados en información de sondajes, mineralogía y litología. Posteriormente se realizaron interpolaciones de leyes de cobre por bloques, ajustando las densidades y

factores de recuperación según la mineralogía identificada. Los resultados mostraron que las zonas de cobre secundario representaban una fracción significativa del recurso total, alcanzando leyes promedio de 0.60 % CuT, lo que permitió redefinir los límites económicos y mejorar la precisión del modelo de estimación. Se concluyó que la correcta identificación de las zonas enriquecidas y la diferenciación entre cobre primario y secundario son determinantes para obtener modelos de recursos confiables y útiles en la planificación minera.

Miranda (2018), en su tesis doctoral titulada “Metodología para la estimación y clasificación de recursos en depósitos de cobre con mineralización mixta (primaria y secundaria) en la región de Antofagasta, Chile”, desarrolló un enfoque integral para mejorar la precisión en la estimación de recursos mediante la diferenciación entre cobre primario y secundario. Su objetivo principal fue establecer un procedimiento metodológico que permitiera identificar y cuantificar de manera precisa ambos tipos de mineralización, considerando su influencia en los modelos de bloques y la estimación económica. La metodología incluyó análisis petrográficos, modelamiento geoestadístico y la integración de datos geoquímicos para delimitar zonas de transición entre los dominios de oxidación y sulfuros. Los resultados demostraron que la incorporación de criterios mineralógicos en la clasificación de bloques redujo significativamente las desviaciones en las leyes estimadas y mejoró la confiabilidad del modelo de recursos. Miranda concluyó que la identificación temprana de cobre secundario es esencial para optimizar tanto los planes de minado como las estrategias de procesamiento, incrementando la eficiencia global del proyecto.

Vargas (2017), en su tesis titulada “Aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la identificación y delimitación de zonas de mineralización secundaria en datos de exploración de cobre”, propuso un enfoque innovador basado en inteligencia artificial para reconocer patrones de mineralización asociados al cobre secundario. El objetivo del estudio fue aplicar algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado, como redes neuronales y máquinas de soporte vectorial, para clasificar zonas mineralizadas a partir de información geoquímica, geofísica y litológica. La metodología

contempló la normalización de datos multivariados y la validación cruzada de los modelos mediante análisis de precisión espacial. Los resultados evidenciaron que el uso de modelos predictivos aumentó la capacidad de detección de zonas de cobre secundario en comparación con los métodos tradicionales de interpretación geológica. Vargas concluyó que la integración de técnicas de aprendizaje automático en las etapas de exploración y modelamiento puede contribuir significativamente a una clasificación más confiable del mineral, mejorando la toma de decisiones en la estimación y planificación minera.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Flores, L. (2015), en su tesis titulada “Influencia de la geoquímica de alteración supergénica en la distribución y estimación de leyes de cobre en la zona enriquecida de un yacimiento tipo pórfido”, desarrolló un estudio enfocado en evaluar cómo los procesos de alteración supergénica influyen en la distribución del cobre secundario y en la precisión de la estimación de recursos. El trabajo se llevó a cabo en un yacimiento tipo pórfido ubicado en el sur del Perú, donde la mineralización presentaba zonas de lixiviación, enriquecimiento y sulfuros primarios. El objetivo principal fue identificar los parámetros geoquímicos más representativos del proceso de enriquecimiento y su impacto en la variación de las leyes de cobre. La metodología incluyó el muestreo de núcleos de sondajes diamantinos, análisis de elementos trazas asociados a la alteración (Fe, S, Mo, Zn), correlaciones mineralógicas y la interpolación de leyes por bloques mediante el método de inverso de la distancia (IDW²). Los resultados demostraron que las zonas con cobre secundario (principalmente calcosina y covelina) presentaban un sesgo positivo en las leyes cuando se modelaban sin distinción de dominios. Asimismo, se identificó una fuerte correlación entre los índices de alteración supergénica y las variaciones de ley en superficie. Flores concluyó que incorporar los indicadores geoquímicos y mineralógicos en la etapa de estimación permite mejorar la consistencia del modelo de bloques, reducir los errores de sobrestimación y reflejar de manera más precisa la naturaleza real del recurso explotable.

Quispe, R. (2020), en su tesis de maestría titulada “Desarrollo de un modelo para la segregación de dominios mineralizados primarios y secundarios en un depósito de cobre estratoligado en Perú”, propuso un enfoque metodológico para mejorar la precisión en la estimación de recursos mediante la delimitación de dominios mineralizados en función de su génesis. Su objetivo principal fue establecer un modelo de bloques que reflejara de manera diferenciada las características de los minerales primarios (calcopirita y bornita) y secundarios (malaquita, crisocola y calcosina). La metodología se basó en la recopilación de información geológica, mineralógica y de sondajes, seguida por la construcción de sólidos tridimensionales que representaron los límites entre los dominios oxidado, enriquecido y primario. Para la estimación de leyes se aplicaron métodos de interpolación geométrica, y los resultados fueron comparados con datos metalúrgicos obtenidos en pruebas de laboratorio. Los resultados evidenciaron que la segregación de dominios permitió reducir las diferencias entre las leyes estimadas y las recuperaciones reales, además de identificar zonas de enriquecimiento lateral no reconocidas en modelos previos. Quispe concluyó que la diferenciación clara entre mineralización primaria y secundaria permite optimizar la estimación de recursos, mejorar la predictibilidad del comportamiento metalúrgico y fortalecer la toma de decisiones para la planificación de minado.

Rojas, M. (2021), en su tesis de maestría titulada “Optimización de la estimación de recursos en yacimientos con cobre secundario mediante ajuste de parámetros en modelos de bloques”, desarrolló una investigación aplicada en un yacimiento tipo pórfido del sur del Perú con fuerte presencia de cobre secundario. El objetivo fue evaluar el impacto de la calibración de parámetros geométricos y de interpolación en la estimación de recursos, considerando la influencia de la mineralogía del cobre oxidado y enriquecido. La metodología incluyó la construcción de modelos tridimensionales con distintos tamaños de bloque, radios de búsqueda y métodos de interpolación (poligonal y IDW), contrastando los resultados con los datos metalúrgicos y de producción. Los resultados indicaron que los modelos con parámetros calibrados a la variabilidad espacial del cobre secundario presentaban menor error relativo y mayor coherencia geológica, en comparación con

modelos generados con parámetros estándar. Asimismo, se observó que la representación del cobre secundario influía significativamente en el cálculo de tonelaje y en la clasificación de recursos. Rojas concluyó que la optimización de los parámetros de interpolación y la incorporación de información mineralógica detallada en la estimación de bloques son fundamentales para obtener resultados confiables y coherentes con la realidad del yacimiento.

Sánchez, P. (2012), en su tesis de maestría titulada “Evaluación de la incertidumbre en la estimación de recursos de cobre utilizando simulación condicional en depósitos con enriquecimiento supergénico”, abordó la problemática de la variabilidad del cobre secundario en la estimación de recursos de depósitos con procesos supergénicos avanzados. El objetivo general fue comparar el comportamiento de los métodos tradicionales de interpolación (krigeado y poligonal) con enfoques de simulación condicional en la representación de zonas de enriquecimiento. La metodología consistió en la selección de un depósito tipo pórfido en el sur del Perú, la definición de dominios mineralógicos (óxido, enriquecido y primario), la generación de modelos de bloques para cada dominio y la validación de los resultados mediante análisis estadístico y comparación con datos de producción histórica. Los resultados demostraron que los métodos tradicionales tendían a subestimar la variabilidad y sobrestimar las leyes en las zonas supergénicas, mientras que los enfoques que incorporaban información de cobre secundario mostraban una mejor correlación con las leyes obtenidas en mina. Sánchez concluyó que la identificación y delimitación precisa de las zonas supergénicas en los modelos tridimensionales reduce la incertidumbre y mejora la calidad de la estimación de recursos, recomendando la incorporación de variables mineralógicas como soporte en los futuros modelos de bloques.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Fundamentos de la estimación de recursos minerales*

La estimación de recursos minerales constituye una etapa esencial dentro del proceso de evaluación de yacimientos, ya que permite cuantificar de manera confiable el volumen, la ley y el valor económico potencial del mineral contenido en un depósito (Rossi & Deutsch, 2014). Este proceso integra información geológica, geoquímica y estructural, con el propósito de construir un modelo tridimensional que represente de forma precisa la distribución espacial de los minerales. De la calidad de dicha estimación depende en gran medida la factibilidad técnica y económica del proyecto minero, así como la definición de sus reservas (Journel & Huijbregts, 1978).

En términos generales, los métodos de estimación pueden clasificarse en geométricos o tradicionales y geoestadísticos. Los métodos geométricos se sustentan en principios de proximidad, continuidad y representatividad espacial del muestreo (Sinclair & Blackwell, 2002). En este enfoque, el yacimiento se representa mediante una malla tridimensional de bloques (block model), a los cuales se les asignan valores de ley, densidad y tonelaje en función de su cercanía a las muestras disponibles y la geometría del cuerpo mineralizado (Abzalov, 2016). Este tipo de estimación, aunque menos complejo que los métodos geoestadísticos, ofrece una herramienta práctica para el cálculo preliminar de recursos, especialmente en yacimientos donde la distribución mineral es relativamente homogénea o se dispone de una cantidad limitada de datos de perforación.

La interpolación geométrica tradicional se basa en procedimientos como el método de los polígonos de influencia, el método triangular y el método del inverso de la distancia (IDW), los cuales asumen que el valor de una variable en un punto desconocido depende de la distancia a los puntos muestreados. Estos enfoques son especialmente útiles en etapas tempranas de exploración, ya que permiten obtener modelos de bloques simples y fácilmente actualizables (Walthier, 2012). Su aplicación sigue siendo común en

operaciones de pequeña y mediana escala, donde la simplicidad y rapidez del cálculo priman sobre la complejidad matemática.

En la actualidad, el uso del modelo de bloques (block model) constituye el estándar de la industria para la representación espacial de los recursos minerales (Abzalov, 2016). Este modelo consiste en dividir el cuerpo mineralizado en una matriz tridimensional de celdas o bloques de dimensiones fijas, a los cuales se les asignan parámetros como coordenadas, leyes químicas, densidad, tonelaje y categoría de recurso (Rossi & Deutsch, 2014). La precisión del modelo depende en gran medida de la calidad del muestreo, la definición de los dominios geológicos y mineralógicos, y la consistencia del procedimiento de interpolación (Dimitrakopoulos, 2018). En yacimientos de cobre, donde coexisten zonas de mineralización primaria (sulfuros) y secundaria (óxidos o sulfuros enriquecidos), la diferenciación de dominios cobra especial relevancia, ya que determina el tipo de procesamiento metalúrgico más adecuado y afecta directamente la rentabilidad del proyecto (Camus, 2003).

Por ello, una correcta clasificación de los bloques cubrados según su tipo de mineralización (primaria o secundaria) es esencial para evitar sesgos en la estimación de recursos y optimizar la recuperación metalúrgica. Diversos estudios han demostrado que la falta de esta diferenciación puede conducir a una sobrestimación o subestimación de las leyes de cobre, generando inconsistencias entre los modelos geológicos y los resultados metalúrgicos reales (Gómez, 2019; Miranda, 2018). En consecuencia, la reclasificación de los bloques basada en la identificación del cobre secundario representa una herramienta estratégica para mejorar la confiabilidad del modelo de recursos y apoyar una toma de decisiones más precisa en las etapas de planificación minera y procesamiento.

2.1.2 Método tradicional de estimación geométrica por bloques

El método tradicional de estimación geométrica por bloques constituye una técnica ampliamente empleada en minería para cuantificar el contenido metálico de un depósito, especialmente en etapas preliminares de evaluación o en operaciones de pequeña y mediana escala. Se basa en la subdivisión del yacimiento en unidades volumétricas

regulares denominadas bloques, que representan secciones homogéneas del cuerpo mineralizado (Sinclair & Blackwell, 2002). La premisa fundamental de este método es que cada bloque puede aproximarse a un volumen uniforme de roca, cuya ley y tonelaje se calculan en función de los datos de perforación más cercanos.

La secuencia de trabajo involucra las siguientes etapas:

Definición de dominios geológicos.

En esta etapa se delimitan los dominios de mineralización homogénea, los cuales agrupan zonas con características geológicas y mineralógicas similares. Esta delimitación es crucial en yacimientos de cobre donde coexisten zonas primarias (sulfuros) y secundarias (óxidos y sulfuros enriquecidos), debido a las diferencias en densidad, recuperabilidad y comportamiento metalúrgico (Camus, 2003).

Diseño del modelo de bloques.

Consiste en definir las dimensiones y orientación del bloque base, en función del espaciamiento de sondajes y de la geometría del depósito. Por ejemplo, en yacimientos de cobre diseminado, se emplean comúnmente bloques de $10 \times 10 \times 10$ m o $15 \times 15 \times 10$ m (Rossi & Deutsch, 2014). Cada bloque es identificado por coordenadas (x, y, z), volumen V_b , densidad p_b , y ley estimada G_b .

Interpolación o asignación de leyes.

La estimación de leyes en cada bloque se realiza aplicando una interpolación geométrica, es decir, calculando un promedio ponderado de las muestras circundantes. El método más habitual es el inverso de la distancia (IDW), que pondera las muestras de acuerdo con su distancia al centro del bloque:

$$G_b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{G_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

Donde:

G_b = Ley estimada del bloque,

- G_i = Ley de la muestra i ,
 d_i = Distancia entre el bloque y la muestra i ,
 p = Exponente de ponderación (generalmente entre 2 y 3),
 n = Número de muestras consideradas en la interpolación.

Cuando se utiliza el promedio ponderado lineal, la ley estimada se calcula como:

$$G_b = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Donde w_i representa un peso asignado en función del volumen o longitud del muestreo.

En yacimientos con cobre secundario, la precisión del valor estimado mejora si los datos de muestreo están clasificados por tipo de mineralización, evitando mezclar leyes de cobre primario y secundario dentro de un mismo dominio (Flores, 2015; Quispe, 2020).

Cálculo de tonelajes y contenido metálico.

Una vez asignadas las leyes, se procede al cálculo del tonelaje total (T_b) y el contenido metálico (CM_b) de cada bloque, mediante las siguientes expresiones:

$$T_b = V_b * \rho_b \quad (3)$$

$$CM_b = T_b * G_b \quad (4)$$

Donde V_b es el volumen del bloque, ρ_b su densidad promedio (t/m^3) y G_b la ley expresada en fracción decimal.

A partir del conjunto de bloques, el contenido metálico total del dominio o del yacimiento se calcula como la sumatoria:

$$CM_{total} = \sum_{j=1}^m T_{bj} * G_{bj} \quad (5)$$

Este procedimiento permite obtener el inventario global de recursos del yacimiento y su distribución espacial dentro del modelo tridimensional.

Clasificación de recursos.

Finalmente, los bloques son clasificados en categorías de recurso medido, indicado o inferido, según el nivel de confianza asociado al espaciamiento de los datos y la calidad

de la información geológica. La clasificación se realiza siguiendo los estándares internacionales como el JORC Code (2012) o la NI 43-101 (2014), considerando tanto la distancia promedio al punto de muestreo como la densidad de perforaciones (Rossi & Deutsch, 2014).

El método geométrico por bloques, si bien no incorpora directamente modelos de continuidad espacial, ofrece resultados satisfactorios cuando la geología y la distribución de datos son consistentes (Sinclair & Blackwell, 2002). En depósitos con cobre secundario, este enfoque puede adaptarse mediante la reclasificación de los bloques cubicados en función de la mineralogía dominante, ajustando los valores de densidad y ley para reflejar la variabilidad entre zonas oxidada, enriquecida y primaria.

Este tipo de refinamiento, que combina la estructura del modelo de bloques con la identificación mineralógica, permite optimizar las estimaciones de tonelaje y contenido metálico, evitando sobrestimaciones en las zonas de enriquecimiento supergénico y subvaloraciones en las zonas de transición (Gómez, 2019). Así, el método de interpolación geométrica sigue siendo una herramienta válida y flexible para proyectos en los que se busca integrar criterios geológicos, metalúrgicos y económicos de manera práctica y coherente.

2.1.3 Conceptos de cobre primario y cobre secundario

En los depósitos de cobre, la distinción entre mineralización primaria y secundaria constituye un aspecto esencial tanto en la caracterización geológica como en la estimación de recursos. Esta diferenciación permite comprender la distribución del cobre dentro del yacimiento y seleccionar los métodos de beneficio más adecuados, considerando las propiedades químicas, físicas y metalúrgicas de las especies minerales presentes (Camus, 2003; Sillitoe, 2005).

El cobre primario corresponde a la mineralización original del yacimiento, formada durante las etapas magmáticas e hidrotermales del sistema. Generalmente se encuentra en forma de sulfuros como calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y enargita (Cu_3AsS_4), que precipitan a partir de soluciones hidrotermales en condiciones de alta temperatura y

presión (Gustafson & Hunt, 1975). Estos minerales suelen estar asociados a rocas ígneas intrusivas y constituyen el núcleo del sistema mineralizado. En términos económicos, el cobre primario requiere procesos de concentración física, como flotación, debido a su baja solubilidad en medios ácidos y su fuerte asociación con sulfuros de hierro (Peters, 2013).

Por su parte, el cobre secundario se origina por procesos de enriquecimiento supergénico, los cuales ocurren cuando las aguas meteóricas oxidan la zona superior del yacimiento, disolviendo los sulfuros primarios y movilizándolo el cobre disuelto hacia niveles inferiores del perfil (Sillitoe, 2005; Camus, 2003). En estas zonas más reductoras, el cobre se reprecipita como minerales secundarios, tales como calcosina (Cu_2S), covelina (CuS), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y cuprita (Cu_2O), formando una capa de enriquecimiento caracterizada por leyes más altas que las del mineral primario. Este proceso, conocido como enriquecimiento supergénico, puede duplicar o incluso triplicar la ley de cobre original en la zona de enriquecimiento (Gustafson & Hunt, 1975).

Desde el punto de vista metalúrgico, las diferencias entre ambos tipos de cobre son notorias. Los minerales de cobre secundario presentan una mayor solubilidad en medios ácidos y son aptos para procesos hidrometalúrgicos, como lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición (LIX-SX-EW), con recuperaciones superiores al 90 %. En contraste, el cobre primario requiere procesos pirometalúrgicos más costosos, debido a la necesidad de concentración previa y a la menor reactividad de los sulfuros (Peters, 2013).

Estas diferencias repercuten directamente en la clasificación económica y metalúrgica de los bloques cubrados en la estimación de recursos. Un bloque que contiene predominantemente cobre secundario puede ser considerado económicamente viable bajo un esquema de procesamiento hidrometalúrgico, mientras que uno dominado por cobre primario podría quedar clasificado como marginal o no económico bajo los mismos parámetros operativos (Miranda, 2018). Por ello, la correcta identificación de las zonas de cobre secundario y su delimitación dentro del modelo de bloques son fundamentales para la reclasificación de los recursos y la planificación técnica de la mina.

En síntesis, el cobre primario y el cobre secundario representan dos etapas distintas del ciclo mineralizador, pero con implicaciones directas en la estimación de recursos y la rentabilidad del yacimiento. La integración de criterios mineralógicos y geoquímicos en los modelos de bloques permite reflejar con mayor precisión la naturaleza real del mineral, optimizando la evaluación económica y metalúrgica del depósito.

2.1.4 Identificación y modelamiento del cobre secundario

La identificación del cobre secundario constituye una fase crítica en la caracterización y estimación de recursos en yacimientos con mineralización mixta, ya que permite diferenciar las zonas oxidadas, de enriquecimiento supergénico y de sulfuros primarios, las cuales poseen comportamientos metalúrgicos y económicos distintos (Sillitoe, 2005; Camus, 2003). Esta distinción es esencial para la reclasificación de bloques dentro del modelo de recursos, asegurando que la estimación refleje de manera precisa la naturaleza del cobre contenido en cada dominio del depósito.

El proceso de identificación requiere la integración de información geoquímica, mineralógica y de alteración hidrotermal, la cual se obtiene a partir de campañas de perforación y análisis de laboratorio. En particular, se consideran los siguientes criterios técnicos:

- **Relación Cu soluble / Cu total (Cusol/Cutotal):**

Indicador fundamental para estimar la proporción de cobre recuperable mediante lixiviación. Valores mayores a 0,6 suelen asociarse a zonas de cobre secundario u oxidado, mientras que relaciones menores a 0,2 corresponden a mineralización primaria (Camus, 2003; Peters, 2013).

- **Contenido de minerales indicadores:**

La presencia de especies como malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcosina (Cu_2S) o covelina (CuS) se asocia a zonas de oxidación y enriquecimiento. Estos minerales pueden identificarse mediante estudios petrográficos, difracción de rayos X (DRX) o espectrometría de reflectancia (Gustafson & Hunt, 1975).

▪ **Datos de perforación con análisis ácido-soluble o cianuro-soluble:**

Los ensayos Cu-AS (acid soluble copper) y Cu-CN (cyanide soluble copper) permiten cuantificar el cobre disponible para procesos hidrometalúrgicos. Una diferencia significativa entre Cu total y Cu soluble es indicativa de la coexistencia de minerales secundarios y primarios (Peters, 2013).

A partir de estos indicadores, se construyen modelos tridimensionales de dominios mineralógicos, que delimitan las zonas de oxidación, enriquecimiento y sulfuros primarios. Estos modelos se desarrollan utilizando softwares especializados como Datamine, Surpac o Leapfrog Geo, donde las superficies de contacto entre dominios se generan mediante interpolación de datos de sondajes y correlación de litologías y alteraciones (Rossi & Deutsch, 2014).

El siguiente paso consiste en la intersección del modelo de dominios con el modelo de bloques. En esta etapa, cada bloque es reclasificado de acuerdo con la naturaleza del cobre predominante dentro del dominio que ocupa, asignándole una categoría específica (óxido, enriquecido o primario) y los parámetros correspondientes de densidad, ley y recuperación metalúrgica. Esta reclasificación puede expresarse de forma general mediante la función:

$$R_b = f(D_b, G_b, \rho_b) \quad (6)$$

Donde:

R_b = Recuperación o clasificación del bloque,

D_b = Dominio mineralógico asignado,

G_b = Ley estimada del bloque,

ρ_b = Densidad específica asociada al tipo de mineralización.

De esta manera, los bloques ubicados dentro de los dominios de cobre secundario son ajustados para reflejar su mayor potencial metalúrgico y económico, en contraste con los bloques de cobre primario, que suelen requerir procesos de flotación o fundición más costosos. Este enfoque no solo mejora la precisión del modelo de recursos, sino que

permite una planificación minera más eficiente, optimizando la secuencia de extracción y el uso de métodos de beneficio adecuados para cada tipo de mineral.

Diversos estudios han demostrado que la integración de parámetros mineralógicos y geoquímicos en el modelamiento de bloques reduce las desviaciones entre las leyes estimadas y las leyes metalúrgicas reales, además de mejorar la proyección económica de los recursos (Miranda, 2018; Gómez, 2019; Quispe, 2020). En consecuencia, el modelamiento del cobre secundario se constituye en una herramienta clave para la reclasificación de bloques cubicados, aportando mayor confiabilidad al proceso de estimación de recursos y una visión más realista de la rentabilidad del yacimiento.

2.1.5 Reclasificación de bloques en función del cobre secundario

La reclasificación de bloques es una etapa de retroalimentación dentro del proceso de estimación de recursos minerales, cuyo propósito es actualizar o corregir el modelo de bloques original mediante la incorporación de información mineralógica, geoquímica o metalúrgica adicional. En el contexto de depósitos de cobre, esta práctica resulta especialmente relevante cuando los estudios posteriores a la estimación inicial evidencian una proporción significativa de cobre secundario no considerada en el modelo original (Miranda, 2018; Gómez, 2019).

En términos operativos, la reclasificación implica modificar la asignación inicial de leyes, dominios o categorías de recursos de cada bloque, con el objetivo de mejorar la representatividad del modelo frente a la realidad geológica del yacimiento (Rossi & Deutsch, 2014). Este ajuste se fundamenta en la integración de información proveniente de estudios mineralógicos, análisis de cobre soluble, datos metalúrgicos o nuevas perforaciones, que permiten delimitar zonas de oxidación, enriquecimiento supergénico y sulfuros primarios.

La metodología de reclasificación puede resumirse en las siguientes etapas:

Identificación de bloques susceptibles de ajuste.

Se seleccionan los bloques localizados dentro de los dominios definidos como cobre secundario, con base en indicadores como la relación C_{sol}/C_{total} , la presencia de

minerales indicadores (calcosina, covelina, malaquita, crisocola) o el análisis de cobre ácido-soluble (Cu-AS).

Asignación de atributos actualizados.

En los softwares de modelamiento (por ejemplo, Deswik CAD, Datamine, Surpac o Leapfrog EDGE), los bloques identificados se actualizan mediante la asignación de un nuevo atributo o “flag” — por ejemplo, `dominio_cu_secundario = 1` — que indica su pertenencia a la zona de mineralización supergénica.

Reasignación de parámetros de ley, densidad y recuperación.

Los bloques reclasificados adoptan valores de ley promedio y densidad específica acordes a su naturaleza mineralógica. Asimismo, se ajustan los factores de recuperación metalúrgica (R_m), de acuerdo con la ecuación:

$$Cu_{rec} = G_b * R_m \quad (7)$$

Donde:

Cu_{rec} = Cobre recuperable del bloque,

G_b = Ley total del bloque (% CuT),

R_m = Factor de recuperación metalúrgica (adimensional), que suele variar entre 0.85 y 0.95 para cobre secundario (procesos de lixiviación) y entre 0.75 y 0.85 para cobre primario (flotación).

Recalculación de tonelajes y contenido metálico ajustado.

Una vez redefinidos los parámetros, se actualizan los tonelajes (T_b) y contenidos metálicos (CM_b) mediante:

$$T_b = V_b * \rho_b \quad (8)$$

$$CM_b = T_b * Cu_{rec} \quad (9)$$

Donde V_b es el volumen del bloque y ρ_b su densidad específica ajustada al tipo de mineralización.

Generación de reportes y comparación de resultados.

Finalmente, se comparan las estadísticas del modelo reclasificado con el modelo base, a fin de cuantificar el impacto de la corrección sobre el tonelaje total y la ley promedio del depósito. Este análisis permite determinar si la reclasificación reduce las desviaciones entre la estimación y la producción real.

Los beneficios de la reclasificación de bloques son múltiples:

- Corrección de sobrestimaciones o subestimaciones de leyes globales, originadas por la mezcla de dominios primarios y secundarios.
- Optimización de la planificación minera, al diferenciar zonas con distinto tratamiento metalúrgico (hidrometalurgia o flotación).
- Mayor precisión en la evaluación económica del recurso, al reflejar la variabilidad real del cobre recuperable y los costos asociados a cada proceso.

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de criterios mineralógicos en la reclasificación mejora la coherencia entre los modelos geológicos, metalúrgicos y económicos (Miranda, 2018; Quispe, 2020). En este sentido, la reclasificación de bloques basada en el cobre secundario no solo representa una etapa de ajuste técnico, sino también un proceso de optimización estratégica, que incrementa la confiabilidad de la estimación de recursos y contribuye a una mejor toma de decisiones operativas en la explotación minera.

2.1.6 Clasificación de recursos minerales según estándares internacionales

La clasificación de los recursos minerales es una etapa esencial dentro del proceso de estimación, ya que establece el grado de confianza que se tiene sobre la cantidad y la calidad del mineral contenido en un depósito. Esta clasificación determina la base técnica para la evaluación económica, la planificación minera y la eventual conversión de recursos a reservas (Rossi & Deutsch, 2014; Abzalov, 2016).

A nivel mundial, los sistemas más reconocidos para la clasificación de recursos y reservas son el JORC Code (Australasia), el NI 43-101 (Canadá) y el PERC Standard (Europa). Todos ellos comparten los principios de transparencia, materialidad y

competencia profesional, aunque difieren ligeramente en la terminología y los requisitos de documentación (JORC, 2012; PERC, 2017; CIM, 2014).

Estos códigos definen tres categorías principales de recursos minerales, basadas en la cantidad y calidad de la información geológica disponible, así como en el grado de confianza asociado:

- **Recurso medido (Measured Resource):**

Corresponde a zonas del yacimiento donde existe una alta densidad de información de perforación y una sólida interpretación geológica. La continuidad de la mineralización está demostrada con elevado nivel de confianza, permitiendo realizar estimaciones de tonelaje y ley con baja incertidumbre.

- **Recurso indicado (Indicated Resource):**

Representa áreas con densidad moderada de datos y continuidad razonablemente inferida. Aunque la información es suficiente para estimar con precisión aceptable el contenido metálico, puede requerir verificación adicional antes de su conversión a reserva.

- **Recurso inferido (Inferred Resource):**

Se asocia a información geológica limitada o perforaciones espaciadas, donde la continuidad de la mineralización es asumida, pero no comprobada. Los recursos inferidos poseen el mayor grado de incertidumbre y no pueden usarse directamente para estudios de factibilidad (CIM, 2014).

El Código JORC (2012) establece que la clasificación debe basarse no solo en la densidad de perforaciones, sino también en la comprensión geológica y en la calidad de los datos utilizados en la estimación. De igual modo, el Instrumento NI 43-101 (2014) enfatiza que las categorías de recursos deben ser validadas por una persona calificada (Qualified Person), responsable de verificar la consistencia de la información y los supuestos del modelo.

En este contexto, la identificación del cobre secundario adquiere un papel relevante dentro del proceso de clasificación. La integración de información mineralógica y

geoquímica adicional —como la proporción de cobre soluble, la zonificación supergénica o los resultados metalúrgicos— puede incrementar sustancialmente el grado de conocimiento geológico, permitiendo reclasificar recursos inferidos hacia categorías de mayor confianza (indicados o medidos) (Miranda, 2018; Quispe, 2020). Este ajuste no implica un cambio en la cantidad de mineral, sino una mejora en la certidumbre del modelo y en su valor económico esperado.

Por ejemplo, la delimitación precisa de zonas de cobre secundario mediante análisis de Cu ácido-soluble (Cu-AS) o Cu cianuro-soluble (Cu-CN) permite definir dominios más consistentes, reduciendo la variabilidad interna de los bloques y mejorando la continuidad de las leyes estimadas. Esto genera modelos más robustos y confiables, ajustados a las normas internacionales de reporte de recursos (JORC, 2012; CIM, 2014).

En conclusión, los estándares internacionales de clasificación no solo definen las bases técnicas para la estimación de recursos, sino que también proporcionan el marco conceptual para validar y comunicar los resultados con transparencia. Sin embargo, es importante destacar que el objetivo principal de esta investigación no es estimar recursos bajo estándares JORC o NI 43-101, sino evaluar el impacto de la reclasificación de bloques cubrados a partir de la correcta identificación del cobre secundario, utilizando información disponible y métodos coherentes con la realidad operativa del yacimiento. En el caso de los yacimientos con cobre secundario, la correcta identificación y modelamiento de las zonas supergénicas permite fortalecer la confiabilidad del modelo de bloques y, en consecuencia, elevar la categoría del recurso dentro de los sistemas reconocidos internacionalmente.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Cobre primario

Mineralización de cobre formada por procesos geológicos ígneos e hidrotermales, generalmente en forma de sulfuros como la calcopirita o la bornita.

2.2.2 Cobre secundario

Mineralización de cobre originada por procesos de alteración supergénica, en los cuales los minerales primarios se lixivian y enriquecen, generando óxidos, hidróxidos y sulfuros secundarios como la calcosina o la covelina.

2.2.3 Cubicación de bloques

Técnica de modelamiento espacial que consiste en dividir un yacimiento en celdas o bloques tridimensionales, asignando a cada uno propiedades como ley, densidad o tonelaje, con el fin de estimar su contenido metálico total.

2.2.4 Estimación de recursos

Proceso mediante el cual se determina el tonelaje y la ley de un recurso mineral con un grado de confianza establecido, basado en la interpretación de datos geológicos, de muestreo y de análisis químico.

2.2.5 Reclasificación de blocks

Procedimiento que consiste en reasignar la categoría de recurso mineral (inferido, indicado o medido) o las propiedades de los bloques del modelo, a partir de nueva información geológica, mineralógica o metalúrgica que mejora la comprensión del depósito.

2.2.6 Recurso mineral

Concentración de material de interés económico en o sobre la corteza terrestre, cuya forma, calidad y cantidad son tales que existen perspectivas razonables para su eventual extracción económica.

2.2.7 Tratamiento metalúrgico

Conjunto de procesos físicos y/o químicos aplicados para la recuperación de los metales valiosos contenidos en la mena, utilizando métodos como la flotación, la lixiviación o la fundición.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

3.1.1 *Ubicación y accesibilidad*

La Unidad Minera Huanzalá, caracterizada por la presencia de minerales de zinc, plomo, cobre y plata (Zn–Pb–Cu–Ag), se localiza políticamente en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Áncash. El centro operativo se encuentra a aproximadamente 8 km en línea recta y 12 km por vía asfaltada al noroeste del poblado más cercano, Huallanca, y a unos 440 km de la ciudad de Lima.

Desde el punto de vista geográfico, la mina se ubica entre las prolongaciones de la Cordillera Blanca y la Cordillera Huayhuash, al sur del cerro Huanzalá y al noreste de un valle de origen glaciar recorrido por el río Torres. Su altitud varía entre 3,800 y 5,000 m s.n.m., en una zona de topografía abrupta característica de la sierra alta andina.

Las coordenadas del campamento principal son las siguientes:

Coordenadas UTM:

- Norte (N): 8,907,960
- Este (E): 280,050

Coordenadas geográficas:

- Latitud: 09° 52' 04" sur
- Longitud: 76° 59' 50" oeste

El acceso a la Unidad Minera Huanzalá desde la ciudad de Lima puede realizarse mediante diferentes rutas:

Ruta principal:

Desde Lima por la Carretera Panamericana Norte hasta Pativilca, continuando por la vía de penetración a Huaraz, con desvío a la altura de Conococha/Antamina, y un tramo final hacia la mina. La distancia total es de aproximadamente 420 km, con un tiempo estimado de 6 a 7 horas.

Ruta alternativa:

Desde Lima hasta Pativilca (284 km por carretera asfaltada), luego hasta Pachacoto (166 km adicionales también asfaltados) y finalmente a Huanzalá (40 km por carretera afirmada), sumando en total 490 km, con un tiempo promedio de 8 horas.

Ruta complementaria:

Desde Lima pasando por Pativilca, Conococha, Chiquián, Aquia y Pachapaqui, hasta llegar a Huanzalá, cubriendo aproximadamente 510 km de recorrido.

Figura 3

Mapa de ubicación de la mina Huanzala



Nota: Fuente: Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.1.2 Geología regional

La zona de estudio se encuentra emplazada en la prolongación estructural de la Cordillera Blanca y la Cordillera de Huayhuash, dentro del dominio andino central del Perú. Estratigráficamente, el área presenta una secuencia de rocas cuya edad abarca desde el

Jurásico Superior hasta el Cuaternario, lo que evidencia una evolución geológica prolongada marcada por procesos sedimentarios, volcánicos e intrusivos.

3.1.2.1 Estratigrafía. En el entorno de la mina Huanzalá aflora predominantemente una secuencia sedimentaria mesozoica, compuesta por las formaciones Chicama, Chimú, Santa, Carhuaz, Farrat, Pariahuanca, Chulec, Pariatambo, Jumasha y Chota, cuyas edades oscilan entre el Jurásico Superior y el Terciario Inferior. Esta sucesión se encuentra infra-yacente a los volcánicos Tsacra del Terciario Medio, separados por una discordancia angular marcada.

La Cordillera Negra, ubicada entre Huanzalá y la franja costera del Perú, constituye un antiguo arco magmático deformado entre el Cretácico Medio y Superior. En el interior de dicho arco se desarrolló una cuenca marina intra-arco, donde se sucedieron depósitos detríticos seguidos por facies carbonatadas, representando una fase transgresiva marina. Posteriormente, una regresión produjo el descenso del nivel relativo del mar, originando sedimentos de carácter continental.

Durante los procesos de plegamiento y compresión, los sedimentos experimentaron pliegues, cabalgamientos y fracturamientos intensos. En este contexto estructural, entre el Eoceno Medio y Superior, se generaron los cuerpos intrusivos que aprovecharon zonas de debilidad tectónica, formando diques, sills y stocks.

3.1.2.2 Mesozoico.

3.1.2.2.1 Grupo Chicama (Jurásico Superior – Titoniano). La Formación Chicama constituye la unidad más antigua de la región, aflorando en el sector oriental del área de Huanzalá. Está conformada por lutitas y areniscas finas de tonalidades oscuras, con espesores que superan los 500 metros. Representa depósitos marinos del Titoniano (Jurásico Superior).

3.1.2.2.2 Grupo Goyllarisquizga (Cretácico Inferior).

Formación Chimú (Valanginiano Inferior – Medio):

Formada principalmente por ortocuarcitas de grano medio, color gris claro a blanco, compactas y masivas, con intercalaciones de lutitas negras y niveles carbonosos en la

base. En Huanzalá alcanza espesores de 500 a 700 metros, presentando estratificación cruzada y fuerte fracturamiento. Sobreyace a la Formación Chicama e infrayace a la Formación Santa.

Formación Santa (Valanginiano Superior – Hauteriviano Inferior):

Compuesta por calizas gris azuladas con intercalaciones de lutitas y areniscas grises, ocasionalmente con concreciones de chert. Contiene fósiles marinos fragmentados, característicos del Valanginiano Superior. En Huanzalá presenta un espesor promedio de 160 metros, sobreyaciendo concordantemente a la Formación Chimú e infrayaciendo a la Formación Carhuaz.

Formación Carhuaz (Hauteriviano – Barremiano):

Constituida por lutitas y areniscas finas a medianas, de color gris a pardo, con tonalidades amarillentas por intemperismo. En su base aparecen niveles fosilíferos marinos y calizas delgadas. Su espesor en Huanzalá alcanza entre 700 y 1,300 metros. Sobreyace a la Formación Santa e infrayace a la Formación Farrat.

Formación Farrat (Aptiano):

Representa la parte superior clástica del Cretácico Inferior, compuesta por cuarcitas y areniscas laminadas gris pálido a blanco, con intercalaciones de lutitas arenosas. Su espesor promedio en Huanzalá es de 35 a 50 metros, sobreyaciendo a la Formación Carhuaz y subyaciendo a la Formación Pariahuanca.

3.1.2.2.3 Grupo Machay (Cretácico Medio).

Formación Pariahuanca (Aptiano – Albiano Inferior)

Formada por calizas compactas, masivas y azul grisáceas, con intercalaciones de areniscas y lutitas delgadas. Su espesor promedio en la zona es de 150 a 300 metros, alcanzando localmente hasta 400 metros.

Formación Chulec (Albiano Medio)

Constituida por bancos alternados de calizas, margas y lutitas calcáreas, con espesores variables entre 1 y 5 metros. Las rocas muestran coloración gris azulada y pátinas amarillentas por intemperismo. Espesor aproximado: 50 metros.

Formación Pariatambo (Albiano Medio)

Compuesta principalmente por lutitas negras y calizas bituminosas, con intercalaciones de calizas delgadas fosilíferas. En Huanzalá presenta espesores cercanos a 100–120 metros.

Formación Jumasha (Albiano Superior – Turoniano)

Es la unidad calcárea más importante del Perú central, formada por calizas dolomíticas masivas de color marrón a gris amarillento. En Huanzalá presenta espesores de hasta 400 metros, alcanzando 800 metros en su localidad tipo (Jumasha, Pasco).

Formación Chota (Cretácico Superior)

Compuesta por areniscas y conglomerados rojizos, en discordancia angular sobre la Formación Jumasha. Su espesor supera localmente los 500 metros y representa la transición hacia los volcánicos Tsacra del Terciario Medio.

3.1.2.3 Cenozoico.

3.1.2.3.1 Rocas Ígneas (Terciario Medio).

Volcánicos Calipuy o Tsacra

Constituyen una secuencia de lavas, brechas y tobas andesíticas y dacíticas, de color gris verdoso a pardo, con textura afanítica a porfirítica. Estas unidades presentan espesores de hasta 2,000 metros y edades comprendidas entre 14 y 15 millones de años (Mioceno Medio).

Rocas Intrusivas

Se presentan en forma de stocks, diques y sills, de composición variable (granodioritas, tonalitas, pórfidos graníticos y cuarcíferos). Cortan las secuencias sedimentarias y son posteriores a las principales fases de deformación. Dataciones radiométricas en Huanzalá (Stewart, 1974) indican edades entre 9.2 y 7.7 Ma (Mioceno Superior).

Estas intrusiones están íntimamente relacionadas con la mineralización de los Andes Centrales, generando importantes yacimientos polimetálicos.

3.1.2.4 Cuaternario. Los depósitos cuaternarios cubren los fondos de valles y laderas, alcanzando espesores de hasta 100 metros. Están compuestos por materiales morrénicos, fluvio–glaciares, coluviales y aluviales, asociados a procesos glaciares y periglaciares.

Depósitos Morrénicos:

Se distinguen antiguos y recientes; los primeros presentan formas colinadas y redondeadas, originadas durante las glaciaciones pleistocénicas.

Depósitos Aluviales:

Proceden de la erosión de morrenas y rocas aflorantes, conformando terrazas y abanicos aluviales con sedimentos poco consolidados.

Depósitos Coluviales:

Formados por movimientos gravitacionales y deslizamientos, con clastos angulosos en matriz arcillosa, sin clasificación interna definida.

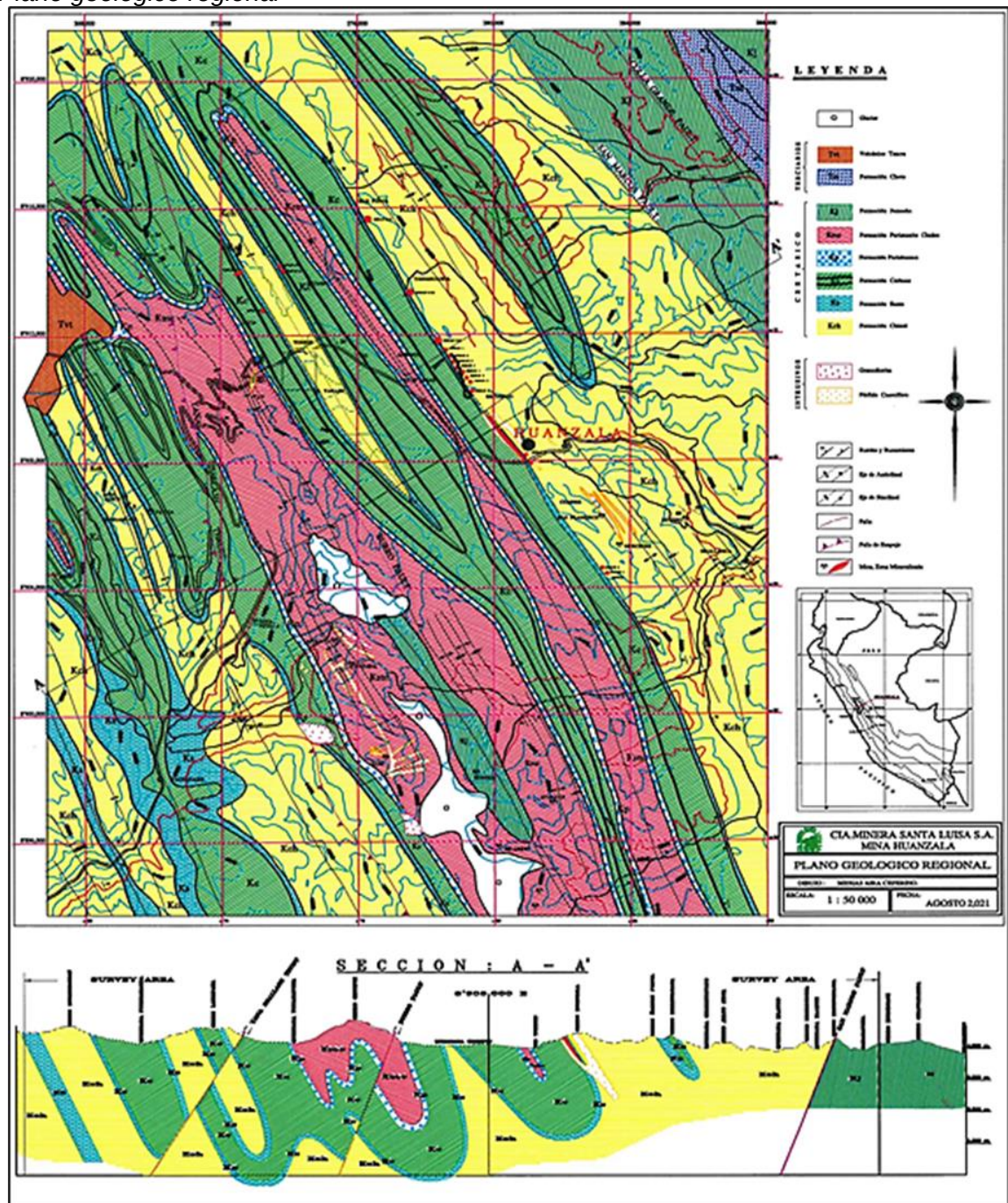
3.1.2.5 Tectónica. Estructuralmente, la región pertenece al bloque comprendido entre la Falla de la Cordillera Blanca y el Geanticlinal del Marañón, dentro del Miogeosinclinal Andino (Cobbing, 1981).

La secuencia sedimentaria presenta pliegues cerrados, anticlinales y sinclinales invertidos, con ejes orientados entre N140°–145°, producto de compresiones de dirección N50°. Se observan pliegues tipo chevron, acompañados de esquistosidad de plano axial bien desarrollada (Mégard, 1979).

Estas deformaciones corresponden a la Fase Incaica, datada aproximadamente en 40 millones de años.

Figura 4

Plano geológico regional



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.1.3 Geología local

En la zona de la mina Huanzala, afloran principalmente unidades sedimentarias correspondientes al Cretácico Inferior y Medio. En el cerro Huanzala, esta sucesión se encuentra invertida, conformando el flanco oriental inverso de un sinclinal cuyo eje tiene una orientación aproximada de N 140° (Carrascal, 1984).

3.1.3.1 Formación Chimú (Valanginiano Inferior – Medio). Esta formación aflora al noreste del cerro Huanzalá, con un rumbo promedio N35°–36°W y buzamiento entre 60° y 70° hacia el noreste. Está constituida principalmente por ortocuarcitas de color blanco a gris, de grano medio a grueso, masivas y con estratificación cruzada, dispuestas en bancos de 1 a 2 metros de espesor. Estas capas se intercalan con lutitas oscuras de 1 a 5 metros de potencia, alcanzando en conjunto más de 100 metros de espesor total.

En la parte superior predominan ortocuarcitas blancas con intercalaciones de areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, en bancos de 20 a 50 cm. El contacto superior con la Formación Santa es concordante y se define en el último banco de ortocuarcita blanca (1 m de espesor), sobre el cual descansan bancos de areniscas gris verdosas (0.5 m), que marcan el inicio de la Formación Santa (Carrascal, 1984).

3.1.3.2 Formación Santa (Valanginiano Medio – Superior). En el área de Huanzalá, esta unidad se divide en dos miembros: Santa Inferior y Santa Superior, ambos con rumbo promedio N42° y buzamiento de 60°–70° NE.

Santa inferior:

Integrada por areniscas gris verdosas (bancos de 0.5–1 m), de grano medio y con cemento calcáreo, intercaladas con lutitas y delgadas capas de calizas. El espesor total varía entre 30 y 40 metros.

Santa superior:

Conformada por calizas intercaladas con lutitas, con potencias de 80 a 120 metros. Según Carrascal (1984), está constituida por calizas negras bituminosas de grano fino a medio, en bancos de 0.5–1 m, con niveles de chert oscuro (0.3 m), dolomías, calcarenitas y calizas fosilíferas con abundantes gasterópodos (*Paraglauconia strombiformis* sp.?). Se presentan además lutitas grises intercaladas de 0.1–0.7 m.

Un rasgo distintivo es la presencia de una brecha sedimentaria con cemento calcáreo, que contiene clastos subangulosos de caliza y chert oscuro, dispuesta concordantemente con una potencia de 2–3 m, utilizada como capa guía.

Las calizas del Santa Superior indican un ambiente de sedimentación somero tipo “tidal” o supratidal (lagunar), con procesos de dolomitización característicos de una plataforma interna. Asimismo, existen evidencias de actividad volcánica sincrónica, reflejada en calizas tufáceas descritas por Samaniego (1981) y en niveles delgados de tobas alteradas dentro del paquete calcáreo.

Los análisis microscópicos realizados por dicho autor revelan la presencia de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas, biotita y anfíboles, con alteración a sericita. Estos niveles se asocian posiblemente a brechas kársticas.

Cabe destacar que en este miembro se alojan los mantos mineralizados V1, V2, V3 y V4, cuya mineralización metasomática afecta las calizas.

3.1.3.3 Formación Carhuaz (Hauteriviano – Barremiano, Aptiano). Aflora en la parte occidental del cerro Huanzalá, con rumbo N42° y buzamiento 60°–70° NE. Se dispone concordantemente sobre la Formación Santa y está compuesta por areniscas grisáceas de grano fino a medio, interestratificadas con lutitas grises.

Figura 5

Formaciones geológicas pertenecientes al yacimiento Huanzala



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.1.3.4 Formación Pariahuanca (Aptiano – Albiano Inferior). Esta formación aflora al oeste de la mina Huanzalá, aunque parcialmente cubierta por un manto de suelo de hasta 5 metros de espesor.

3.1.3.5 Formación Pariatambo (Albiano Medio). Sobreyace a la Formación Pariahuanca y se observa en el lecho del río Torres y en las inmediaciones del campamento Huanzalá, compuesta por lutitas negras y calizas bituminosas con intercalaciones delgadas de caliza.

3.1.3.6 Formación Jumasha (Albiano Superior – Turoniano). Aflora hacia las cabeceras de las quebradas Chuspich y Tanash, conformando los relieves más elevados del área. Está formada por calizas dolomíticas masivas, características de ambientes marinos someros.

3.1.3.7 Rocas Intrusivas. En la zona de Huanzalá se reconocen diques, sills, lacolitos y stocks porfíricos de composición granodiorítica (Cobbing, 1981).

Los diques y sills se disponen dentro de las calizas de la Formación Santa, con anchos de 10 a 50 m y longitudes de 1.5 a 2 km, siguiendo generalmente la estratificación.

El stock principal se emplaza al este de la mina, intruyendo las cuarcitas de la Formación Chimú, con forma elipsoidal, dimensiones aproximadas de 2 km de largo por 200 m de ancho, y textura pórfido cuarcífero.

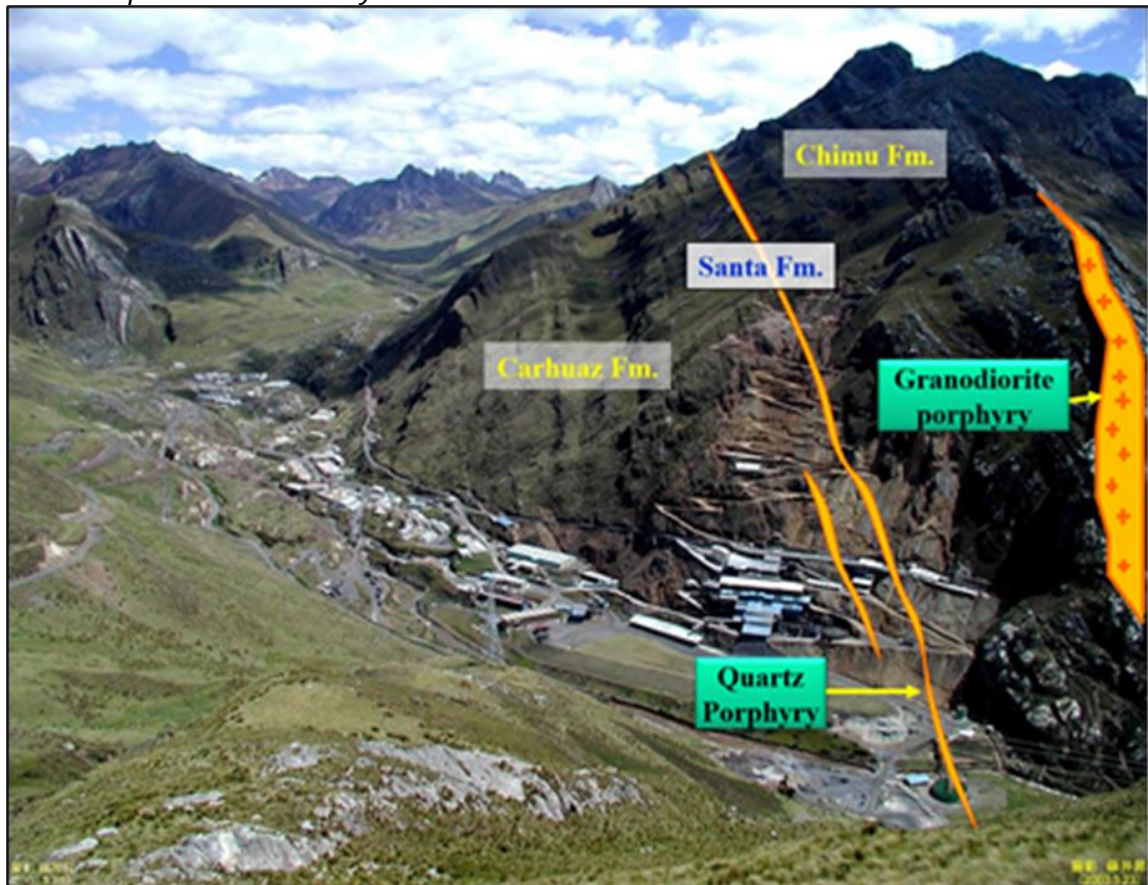
Dataciones radiométricas realizadas por Stewart (1974) mediante el método K/Ar indican edades de 9.2 ± 0.5 Ma para el stock y 7.7 ± 0.4 Ma para los diques y sills, correspondientes al Mioceno Superior.

Petrográficamente, estos intrusivos muestran fenocristales de plagioclasa, ortoclasa, cuarzo, biotita y hornblenda alterados a clorita, carbonatos y sericita.

La matriz es de grano fino, compuesta por cuarzo y plagioclasas turbiditas con diseminación de pirita.

Figura 6

Intrusivos pertenecientes al yacimiento Huanzala



Nota: Fuente: Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.1.3.8 Depósitos Cuaternarios. Los depósitos morrénicos representan el primer evento cuaternario y se distribuyen ampliamente en los valles glaciares en forma de secciones en “U”. Se observan depósitos morrénicos antiguos y recientes, especialmente en las laderas de la Cordillera Blanca.

Los depósitos aluviales derivan de la erosión de morrenas y rocas locales, formando abanicos y terrazas aluviales en los ríos del área, como el río Torres, que desemboca en la laguna Contaycocha.

Los depósitos de piedemonte se desarrollan en las faldas de los cerros, producto de caídas de rocas, deslizamientos y movimientos gravitacionales, visibles en las quebradas Chuspic y Tanash, así como en el curso del río Torres.

3.1.3.9 Tectónica Local. El área presenta un sinclinal con eje N145° (N35°W), cuyo flanco oriental invertido aloja el yacimiento de Huanzalá. Este plegamiento se asocia a la fase incaica de deformación (≈40 Ma).

Los cuerpos mineralizados han sido cortados y desplazados por dos sistemas principales de fallas y fracturas, previos al emplazamiento de los intrusivos granodioríticos. Eventualmente se reconocen reactivaciones tardías, que generan pequeños desplazamientos de los diques y sills observables en interior mina.

Figura 7

Columna estratigráfica local

CRETACEO SUPERIOR

EDAD	FORMACION	COLUMNA	Potencia	LITOLOGIA
ALBIANO	F. PARIATAMBO		200+	CALIZAS INTERCALADAS CON LUTITAS De color gris oscuro calizas fosilíferas y lutitas de color gris oscuro de grano muy fino.
	F. PARIAHUANCA ???? Veta 2 Veta 1		240+ 330+	CALIZAS De color gris a gris oscuro de grano muy fino fosilíferas con intercalaciones de areniscas recristalizadas y lutitas.
APTIANO	F. FARRAT		28-38	ORTOQUARZITA CON INTERCALACION DE LUTITAS
BARREMIANO I HAUTERIVIANO	GRUPO GOYLLARISQUIZGA F. CARHAZ		750 I 1400	ARENISCAS CON INTERCALACION DE LUTITAS De color gris claro areniscas de grano medio a fino cruzadas en capas lutitas de color gris claro de grano fino. SUPERIOR 150-200M Delgadas capas de lutita de color mamon rojo a verde claro. INFERIOR 100M Intercalacion de caliza gris oscura de grano fino a medio.
		Veta 7 Veta 6 Veta 5		
		Veta 4		
		Veta 3 Veta 1		
VALANGINIANO I BERRIASIANO	F. SANTA		137 I 167	CALIZAS Color gris claro de grano medio a grueso con intercalaciones de lutitas de color gris.
	F. CHIMÚ		400+	ORTOQUARZITAS De color gris a blanco de grano medio a grueso con intercalaciones de lutita gris oscura.

Nota: Fuente: Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.1.4 Mineralización

El área forma parte del sistema andino de la Cordillera de Huayhuash. Huanzalá corresponde a un manto polimetálico de aproximadamente 5 km de longitud, alojado principalmente en el Miembro Superior de la Formación Santa (Grupo Goyllarisquiza, Cretácico Inferior, Áncash).

Las Formaciones Santa y Carhuaz fueron intruidas durante el Terciario por cuerpos generados desde un foco magmático profundo (granodiorita): sills, diques y un stock (de facies pórfido cuarcífero). Estos intrusivos levantaron y fracturaron la roca encajonante y provocaron metamorfismo de contacto. Conjuntamente, fluidos hidrotermales ácidos — post-consolidación magmática— cargados con complejos metálicos ascendieron por zonas de debilidad (fracturas y fallas preexistentes, destacando el sistema Lower Fault, y nuevas fracturas ligadas a la intrusión). Durante su ascenso e interacción con las calizas de la Formación Santa se produjo un proceso casi simultáneo de disolución–deposición capilar, reemplazo y sustitución mineral, con neutralización progresiva de la acidez y precipitación de especies metálicas. El reemplazamiento se concentró en horizontes calcáreos favorables, lo que explica las geometrías lenticulares, interdigitaciones y cuerpos masivos/irregulares observados.

El metamorfismo térmico de lutitas a hornfels liberó aguas metamórficas que, mezcladas con los fluidos hidrotermales, contribuyeron a la mineralización de Cu, Pb y Zn, con valores de Ag. Posteriormente, cerca de superficie, el agua meteórica generó meteorización química y lixiviación hasta ~100 m de profundidad, formando una zona de oxidación y, por debajo, una zona de enriquecimiento supergénico: los sulfatos solubles descendentes reemplazaron iones en sulfuros (principalmente en pirita), formando sulfuros secundarios y mejorando las leyes.

Adicionalmente, pulsos hidrotermales tardíos asociados al pórfido cuarcífero —con T–P relativamente uniformes— favorecieron la piritización proximal (abundancia de pirita junto al pórfido). Tectónica posterior generó fallas subverticales que desplazan mantos y

rocas de caja; se observa removilización en fracturas finas rellenas por galena y, en menor proporción, esfalerita.

En síntesis, la mineralización de Huanzalá se concentra en cuerpos estratiformes, lenticulares, interdigitados y masivos, concordantes con la estratificación, junto con cavidades kársticas (paleo- y neokarst) rellenas con mena y/o ganga. Las zonas de mineral serán discretas y separadas, empleándose capas de lutitas como capa guía. Inicialmente se distinguían 5 horizontes; hoy se reconocen 9: Vetas 1–4 en la Santa Superior y Vetas 5–9 en Carhuaz, con anchos de 2–20 m (V5 a V1T, respectivamente), longitudes hasta 300 m, rumbos N 30°–50° W y buzamientos 50°–70° NE.

3.1.4.1 Tipos de mineralización económica

Pb–Zn en pirita

Mena de Pb–Zn alojada en pirita masiva: esfalerita roja de grano fino (Fe 5–10%), galena de grano medio, trazas de calcopirita y arsenopirita. Se observan bandeamientos de esfalerita negra/parduzca en pirita fina (texturas tipo “tigre” y “mirmequítica”), así como delgadas intercalaciones de lutita gris. Ocurre de forma masiva en Mantos 1, 3 y 5, con predominio en el norte (Recuerdo). En Huanzalá Principal, destaca en V-1PB y V3; en Huanzalá Sur, la mena se asocia a pirita (V1P, V1T), con pirrotita y wurtzita junto a esfalerita y galena (granulometría fina a muy fina). Frecuente bitumen.

Pb–Zn en skarn

Ensamble con esfalerita rojo-marrón (Fe 3–5%), galena media y calcopirita subordinada, organizado en bandas de mena (esfalerita negra –V2–, roja –VD4–, galena, calcopirita, pirita) dentro de ganga calcosilicática (diópsido, granate–grosularia, wollastonita, epidota) de grano grueso. Existen relictos de lutita gris oscura parcialmente reemplazada. Presente en tramos de las Vetas 2, 4, 5 y periferias de cuerpos piritosos en contacto con caliza estéril. Es característico en Huanzalá Profundo, con alteración argílica (shiroji) en intercalaciones (p.ej., 1.50 m de skarn / 0.9 m de shiroji).

Pb–Zn en shiroji (alteración argílica)

Producto de alteración hidrotermal de pirita y skarn. Matriz arcillosa blanca (dominancia de caolín), esfalerita marrón (Fe ~0.5%), frecuentes inclusiones finas de calcopirita. Exhibe estructuras sedimentario-diagenéticas (p.ej., slumping) y formas concéntricas donde interviene la mena. La deformación se restringe al manto mineral. Predomina en Mantos 1 y 3 (Huanzalá Superior). En Huanzalá Principal, ocurre como Pb–Zn en shiroji o en pirita porosa (V2T, V3, V4, V5). Son comunes eflorescencias de cobre secundario (brochantita, malaquita, calcantita) en frentes y accesos. En general, el shiroji presenta mayores leyes; se observa en Huanzalá Superior, y por sectores en Principal y Profundo.

Cu en pirita

Asociaciones de calcopirita, tennantita, bornita, calcosina, enargita y covelina en pirita. En Recuerdo, impregna pirita masiva y puede presentarse en vetas independientes del Pb–Zn. Identificado en Recuerdo y Huanzalá Superior (V3, V2P, V4).

Cu en shiroji

Calcopirita, bornita, calcocita, tennantita asociadas a pirita o impregnadas en la matriz arcillosa blanca.

Cu en skarn

Dominio de calcopirita (con bornita y tennantita) en matriz calcosilicática (diópsido, granate, etc.). Característico de Huanzalá Profundo (V1 y V2T).

Minerales portadores de Ag

La galena concentra cerca del 60% de la plata total (en solución sólida). Le siguen, en aporte, tennantita, minerales Pb–Bi con Ag y minerales de Ag (canfieldita, argentita, pirargirita, estefanita, polibasita, electrum).

3.1.4.2 Secuencia paragenética de la mineralización.

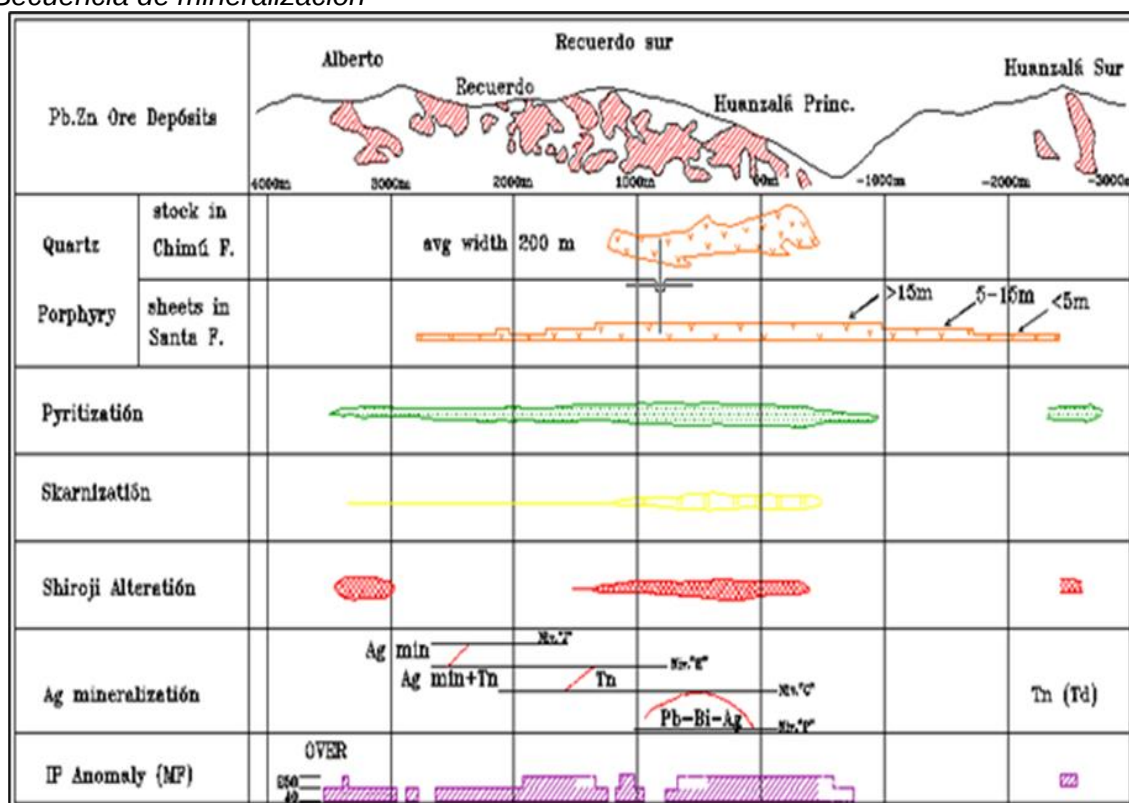
- Piritización casi simultánea de la intrusión del Pórfido Cuarcífero.
- Skarnización y mineralización de Esfalerita roja.
- Mineralización de galena, seguido por minerales de Cu.(Calcopirita)

- Alteración de tipo Shiroji y mineralización de Esfalerita negra.
- Mineralización de Bornita con Calcopirita.
- Mineralización de Tennantita.

Esta secuencia refleja una zonalidad ligada al pórfido cuarcífero y condiciones T–P–fO₂ cambiantes, coherentes con la paragénesis observada.

Figura 8

Secuencia de mineralización



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzalá

3.1.4.3 Minerales de mena.

Esfalerita (ZnS).

Mena predominante en Huanzalá. Sistema cúbico, brillo resinoso, H = 3.5–4, color pardo–marrón (hasta negra cuando es marmatita, Fe hasta ~20%), raya castaño. Ocurre en masas compactas; tetraedros comunes (a menudo estriados), maclas ley de la espinela. Respuesta UV: en general nula en cristales negros brillantes; algunos tipos rojo ladrillo débil (UV corta) a más intenso (UV larga). Se han observado pseudomorfos tras pirrotita (menos frecuentes que piritita→pirrotita).

Figura 9

Esfalerita de mina Huanzala



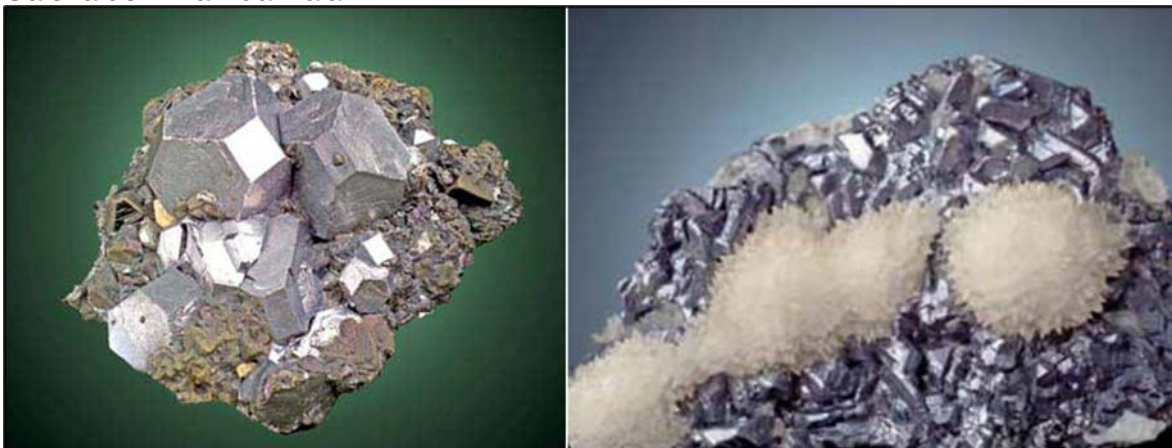
Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

Galena (PbS)

Sistema cúbico, color gris plomo, raya gris-negra, $H = 2-3$, $GE \approx 7.5$, brillo metálico. Se presenta en cristales y masas granulares/impregnaciones. Impurezas de Ag son habituales. Morfologías cubo, cubo-octaédrica y dodecaédrica, con intercrecimientos frecuentes; localmente aspecto de “fundición aparente” por disolución parcial natural. Maclas espinela ocasionales; cristales hasta ~ 2.5 cm; puede asociarse con baritina blanca.

Figura 10

Galena de mina Huanzala



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

Calcopirita (CuFeS_2)

Sistema tetragonal, color amarillo latón, raya oscura, $H = 3.5-4$, brillo metálico. Puede contener Ag y Au en trazas. En Huanzala aparece subordinada respecto a Zn y Pb,

como impregnaciones y en zonas de alteración junto con calcosina. Es el principal Cu primario típico de ambientes pórfido-cobre.

Figura 11

Calcopirita de mina Huanzala



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

3.2 Metodología de estimación

Si bien existen softwares especializados para el modelamiento de recursos minerales, como Leapfrog, Vulcan, Datamine o Surpac, en el presente estudio se optó por el uso de AutoCAD debido a consideraciones técnicas y operativas vinculadas a la naturaleza y calidad de la información disponible. La mayor parte de los datos geológicos y de muestreo se encuentran en formato físico (planos y secciones en papel), lo que limita su integración directa en plataformas geoestadísticas que requieren bases de datos digitales estructuradas y validadas.

El método aplicado corresponde a una cubicación tradicional por bloques, sustentada en la interpretación geológica y en la identificación espacial del cobre secundario, más que en procesos de interpolación estadística de leyes. En este contexto, AutoCAD permitió una digitalización precisa de secciones, cuerpos mineralizados y bloques cubcados, preservando la coherencia geométrica del modelo original sin introducir supuestos estadísticos que no pueden ser debidamente validados con la información existente.

Asimismo, la investigación se enfoca en la reclasificación y análisis comparativo de bloques previamente cubcados, y no en la generación de un nuevo modelo de recursos,

lo que hace pertinente el uso de una herramienta de modelamiento geométrico y volumétrico. La aplicación de métodos geoestadísticos, como kriging o simulación condicional, no resulta metodológicamente viable debido a la ausencia de una base de datos digital continua, a la limitada densidad y distribución espacial de los datos, y a la imposibilidad de realizar un análisis variográfico representativo.

3.2.1 Medición y cálculo del área

La determinación precisa de las superficies constituye un paso fundamental dentro del proceso de estimación de reservas y recursos minerales, ya que permite definir con exactitud la base geométrica sobre la cual se calculan los volúmenes y, posteriormente, los tonelajes. En este estudio, la medición de las áreas se efectuó mediante el método de triangulación, técnica ampliamente utilizada en levantamientos topográficos, geodésicos y geológicos por su capacidad de adaptarse a superficies irregulares y por su precisión en la representación de geometrías complejas.

La triangulación consiste en dividir la superficie a medir en una serie de triángulos elementales, cuyos vértices corresponden a puntos previamente determinados por coordenadas planimétricas. A partir de los lados y ángulos conocidos, se calcula el área de cada triángulo, obteniéndose la superficie total como la sumatoria de los triángulos parciales. Este procedimiento permite mantener la consistencia geométrica y minimizar los errores acumulativos que podrían afectar la estimación del recurso.

Con el propósito de garantizar la homogeneidad y confiabilidad de los resultados, se estableció que todas las áreas y los promedios inferiores a 1 m² sean redondeados conforme a criterios predefinidos de precisión, evitando desviaciones no representativas en la estimación final. Este criterio de redondeo uniforme contribuye a mantener la coherencia de los cálculos y la comparabilidad de los resultados entre niveles y secciones del yacimiento.

3.2.2 Cálculo del volumen

El cálculo volumétrico es la etapa siguiente en la estimación de recursos, y se realiza una vez definida la extensión espacial del cuerpo mineralizado entre dos planos

paralelos: uno superior, que delimita la parte alta del yacimiento, y otro inferior, que marca su base. Ambos planos son determinados a partir de observaciones geológicas continuas, levantamientos topográficos y correlación de datos de perforación.

El principio geométrico aplicado corresponde al método de secciones paralelas, el cual permite obtener un valor representativo del volumen a partir de las áreas delimitadas en ambos planos y la distancia vertical que los separa (altura o espesor del cuerpo). La expresión matemática utilizada se define como:

$$V = \frac{A_s + A_i}{2} * h \quad (10)$$

Donde:

V = Volumen del cuerpo mineralizado (m³),

A_s = Superficie superior (m²),

A_i = Superficie inferior (m²),

h = Distancia vertical o altura entre ambos planos (m).

Este método ofrece una aproximación confiable a la geometría real del yacimiento, ya que considera las variaciones naturales que pueden existir entre las secciones. La aplicación sistemática del método en todos los niveles de trabajo permite obtener una representación volumétrica coherente y comparable, facilitando la posterior conversión del volumen en tonelaje.

3.2.3 *Peso específico*

El peso específico o densidad aparente (ρ) constituye un parámetro esencial en la estimación de recursos, ya que permite transformar el volumen del cuerpo mineralizado en tonelaje, expresado en toneladas métricas (t). La densidad refleja la relación entre la masa del mineral y su volumen, e integra las características mineralógicas y texturales de la roca.

Para el presente estudio, se adoptaron valores de densidad estándar determinados de acuerdo con la naturaleza mineralógica predominante del yacimiento, conforme a estudios petrográficos y ensayos gravimétricos previos. Los valores utilizados fueron los siguientes:

Tabla 2*Peso específico de los minerales*

TIPO DE MINERALIZACIÓN	DENSIDAD APARENTE (t/m ³)
Mineral tipo pirítico	3,7
Mineral tipo shiroji	3,1
Mineral tipo skarn	3,4

Nota: Fuente elaboración propia

Estos valores se aplicaron tanto al cálculo de los volúmenes de mineral como al desmonte proveniente de las paredes laterales, con el fin de mantener la uniformidad y consistencia en todos los resultados. Es importante destacar que variaciones significativas en la densidad podrían inducir errores en el cálculo de tonelajes y, por ende, alterar la ley promedio del mineral estimada.

La relación fundamental utilizada para convertir volumen a tonelaje se expresa como:

$$T = V * \rho \quad (11)$$

Donde:

T = Tonelaje total (t),

V = Volumen del cuerpo mineralizado (m³),

ρ = Densidad aparente (t/m³).

El control riguroso de este parámetro resulta determinante para la exactitud global de la estimación de recursos, especialmente en cuerpos heterogéneos donde pueden coexistir zonas de cobre primario y secundario con diferencias notables en composición y porosidad.

3.2.4 Cálculo de la ley

La ley del mineral (G) representa la concentración del elemento de interés (en este caso, cobre) dentro de una muestra o sector del yacimiento, y se expresa habitualmente en porcentaje (% Cu). La determinación de la ley se realiza a partir de las muestras

recolectadas en los distintos niveles o frentes de explotación, las cuales son analizadas químicamente para obtener el contenido metálico individual.

Para obtener un valor representativo a escala de bloque o nivel, se utiliza el promedio ponderado de leyes, el cual considera la longitud o volumen representativo de cada muestra. Este método asegura que los resultados reflejen la verdadera proporción de cada sector muestreado dentro del conjunto total, evitando sesgos que podrían generarse si se empleara un promedio simple. La fórmula aplicada se expresa como:

$$G_p = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i * L_i)}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (12)$$

Donde:

G_p = Ley ponderada (% Cu),

G_i = Ley individual de la muestra i,

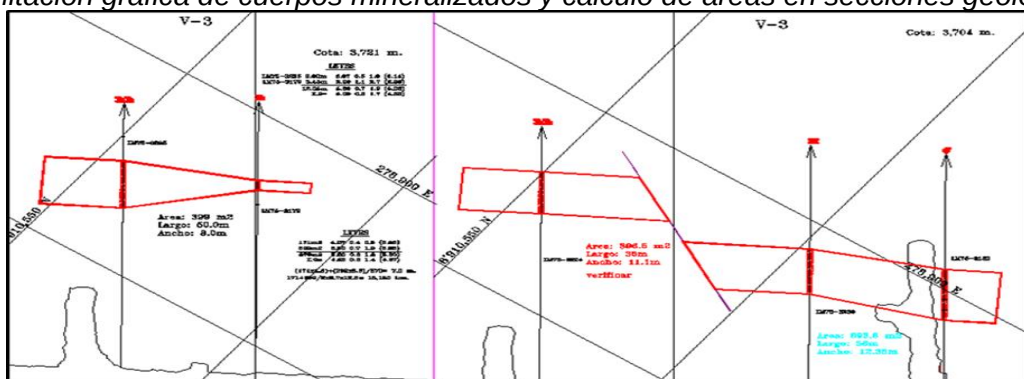
L_i = Longitud o intervalo representativo de la muestra i,

n = Número total de muestras consideradas.

El uso del promedio ponderado garantiza una estimación proporcional y representativa, ajustada a la variabilidad geológica del yacimiento. En zonas donde se ha identificado cobre secundario, este procedimiento permite obtener una ley ponderada diferencial, que distingue las zonas de enriquecimiento supergénico respecto a las de mineralización primaria, mejorando la precisión de los resultados y su aplicación en el modelo de bloques.

Figura 12

Delimitación gráfica de cuerpos mineralizados y cálculo de áreas en secciones geológicas



Nota: Fuente Cia. Minera SANTA LUISA – U. Minera Huanzala

En conjunto, los procedimientos descritos —medición del área, cálculo volumétrico, aplicación del peso específico y determinación de la ley ponderada— conforman el núcleo de la metodología de estimación de recursos empleada en el presente estudio. La aplicación sistemática de estos pasos permite obtener resultados consistentes, verificables y ajustados a la geometría y naturaleza del yacimiento.

El proceso, al integrar criterios geométricos y mineralógicos, posibilita una estimación confiable del contenido metálico total (CM) mediante la relación:

$$CM = T * G_p \quad (13)$$

Donde CM es el contenido metálico expresado en toneladas de cobre fino (t Cu).

La metodología propuesta, basada en principios geométricos y en la caracterización del cobre secundario, constituye una herramienta práctica para refinar los modelos de bloques, reducir la incertidumbre en la estimación de recursos y mejorar la confiabilidad de la evaluación económica del depósito.

3.3 Modelamiento de bloques

Con el propósito de respaldar la interpretación geológica y validar la consistencia del modelo, en los anexos se presentan fotografías de los testigos de perforación estudiados durante la etapa de estimación de recursos. Dichas imágenes constituyen evidencia visual del registro mineralógico, textural y estructural que sirvió de base para la identificación de dominios de cobre primario y secundario, aportando un soporte técnico complementario al modelamiento desarrollado en esta sección.

3.3.1 Cálculo de los blocks 379 y 380 de la V2T

El presente apartado detalla el procedimiento de estimación volumétrica y cálculo de recursos correspondiente a los blocks 379 y 380 de la veta V2T, los cuales fueron modelados y cubicados mediante el software AutoCAD, como parte del proceso de estimación 2024. Estos bloques han sido interpretados preliminarmente como pertenecientes al dominio de cobre primario, siendo su análisis fundamental para la posterior reclasificación basada en la identificación del cobre secundario.

Para la determinación de las dimensiones y el volumen de cada bloque, se aplicó la metodología geométrica descrita en el capítulo anterior, basada en la medición de superficies superior e inferior, la estimación del volumen intermedio y la conversión a tonelaje mediante la densidad del material.

3.3.1.1 Medición de la superficie superior. La Tabla 3 presenta las dimensiones correspondientes a la parte superior de los blocks cubicados. Se consideraron las variables ancho horizontal (AVH), longitud del tramo mineralizado, y su producto, que representa el área superior (A_s) de cada bloque.

Tabla 3

Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 379 y 380 de la V2T

BLOCK	ARRIBA AVH (m)	ARRIBA LONGIT (m)	ARRIBA ÁREA (m ²)
379	7.59	30.0	228
380	8.32	85.7	713

Nota: Fuente elaboración propia

Las áreas fueron determinadas a partir de las secciones levantadas en el software AutoCAD, verificando su correspondencia geométrica con los sondeos proyectados y manteniendo la coherencia dimensional del modelo tridimensional.

3.3.1.2 Medición de la superficie inferior. La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos para la parte inferior de los mismos blocks. El procedimiento es análogo al anterior, considerando el ancho, la longitud y su producto, que define el área inferior (A_i) de cada bloque.

Tabla 4

Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 379 y 380 de la V2T

BLOCK	ABAJO AVH (m)	ABAJO LONGIT (m)	ABAJO ÁREA (m ²)
379	8.3	85.7	713
380	7.0	117.2	825

Nota: Fuente elaboración propia

Estas mediciones permiten cuantificar con precisión la base geométrica de cada bloque, sirviendo como fundamento para el cálculo volumétrico posterior.

3.3.1.3 Cálculo del volumen. El volumen de cada bloque se determinó considerando la media aritmética de las superficies superior e inferior y la altura del bloque. Este método permite representar de manera aproximada la forma real del cuerpo mineralizado y sus variaciones geométricas entre niveles.

Tabla 5

Cálculo del volumen de los blocks 379 y 380 de la V2T

BLOCK	$((A_s + A_i)/2)$	ALTURA (m)	VOLUMEN (m³)
379	470.5	14.5	6,820
380	769.0	18.0	13,842

Nota: Fuente elaboración propia.

El volumen obtenido representa un valor confiable de la extensión real de cada bloque, reflejando la continuidad estructural y morfológica de la veta V2T.

3.3.1.4 Cálculo del tonelaje y recursos. El tonelaje total y la cantidad estimada de recursos minerales se calcularon a partir del volumen de cada bloque, multiplicado por la densidad aparente del mineral. En este caso, ambos bloques corresponden al mineral tipo shiroji, cuya densidad adoptada fue de 3,1 t/m³, valor representativo de este tipo de litología.

Tabla 6

Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 379 y 380 de la V2T

BLOCK	ANCHO (m)	VOLUMEN (m³)	MINERAL TIPO	RECURSOS (t)
379	8.1	6,820	Shiroji (3.1 t/m³)	21,140
380	7.6	13,842	Shiroji (3.1 t/m³)	42,910

Nota: Fuente elaboración propia

Sección de los bloques 379 y 380 de la veta V2T



3.3.2 Cálculo de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

50

El procedimiento seguido para la estimación de las dimensiones, volúmenes y recursos mantiene los mismos criterios metodológicos aplicados a la veta V2T, considerando las áreas superior e inferior, la altura efectiva y la densidad del mineral tipo shiroji (3,1 t/m³).

3.3.2.1 Medición de la superficie superior. La Tabla 7 resume las dimensiones de la parte superior de los blocks cubicados, expresadas en ancho horizontal (AVH), longitud y área resultante.

Tabla 7

Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

BLOCK	ARRIBA AVH (m)	ARRIBA LONGIT (m)	ARRIBA ÁREA (m ²)
517	9.1	30	273
519	9.7	45	435
523	7.8	30	233

Nota: Fuente elaboración propia

Los valores se determinaron a partir de las secciones longitudinales de perforación y la geometría modelada del cuerpo mineralizado.

3.3.2.2 Medición de la superficie inferior. En la Tabla 8 se muestran los datos obtenidos para la parte inferior de los bloques, bajo el mismo procedimiento de medición y cálculo de área.

Tabla 8

Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

BLOCK	ABAJO AVH (m)	ABAJO LONGIT (m)	ABAJO ÁREA (m ²)
517	6.0	66.4	397
519	LINE	LINE	LINE
523	4.9	54.8	266

Nota: Fuente elaboración propia

Los valores ausentes en el block 519 corresponden a registros sin medición directa, motivo por el cual su superficie inferior fue inferida en la etapa de modelamiento volumétrico, garantizando la continuidad geométrica del depósito.

3.3.2.3 Cálculo del volumen. El volumen total de cada bloque fue determinado considerando la media de las áreas superior e inferior multiplicada por la altura del bloque. Los resultados se presentan en la Tabla 9, donde se resumen los valores intermedios y el volumen final obtenido para cada bloque.

Tabla 9

Cálculo del volumen de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

BLOCK	$((A_s + A_i)/2)$	ALTURA (m)	VOLUMEN (m³)
517	335	19.0	6,366
519	217.5	10.0	2,174
523	249.5	15.0	3,741

Nota: Fuente elaboración propia

El block 517 presenta el mayor volumen dentro del conjunto analizado, asociado a una mayor altura y continuidad estructural del mineral, mientras que el block 519 refleja una menor extensión vertical.

3.3.2.4 Cálculo del tonelaje y recursos. El tonelaje estimado se obtuvo multiplicando el volumen de cada bloque por la densidad aparente del mineral tipo shiroji (3,1 t/m³). Los resultados se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10

Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

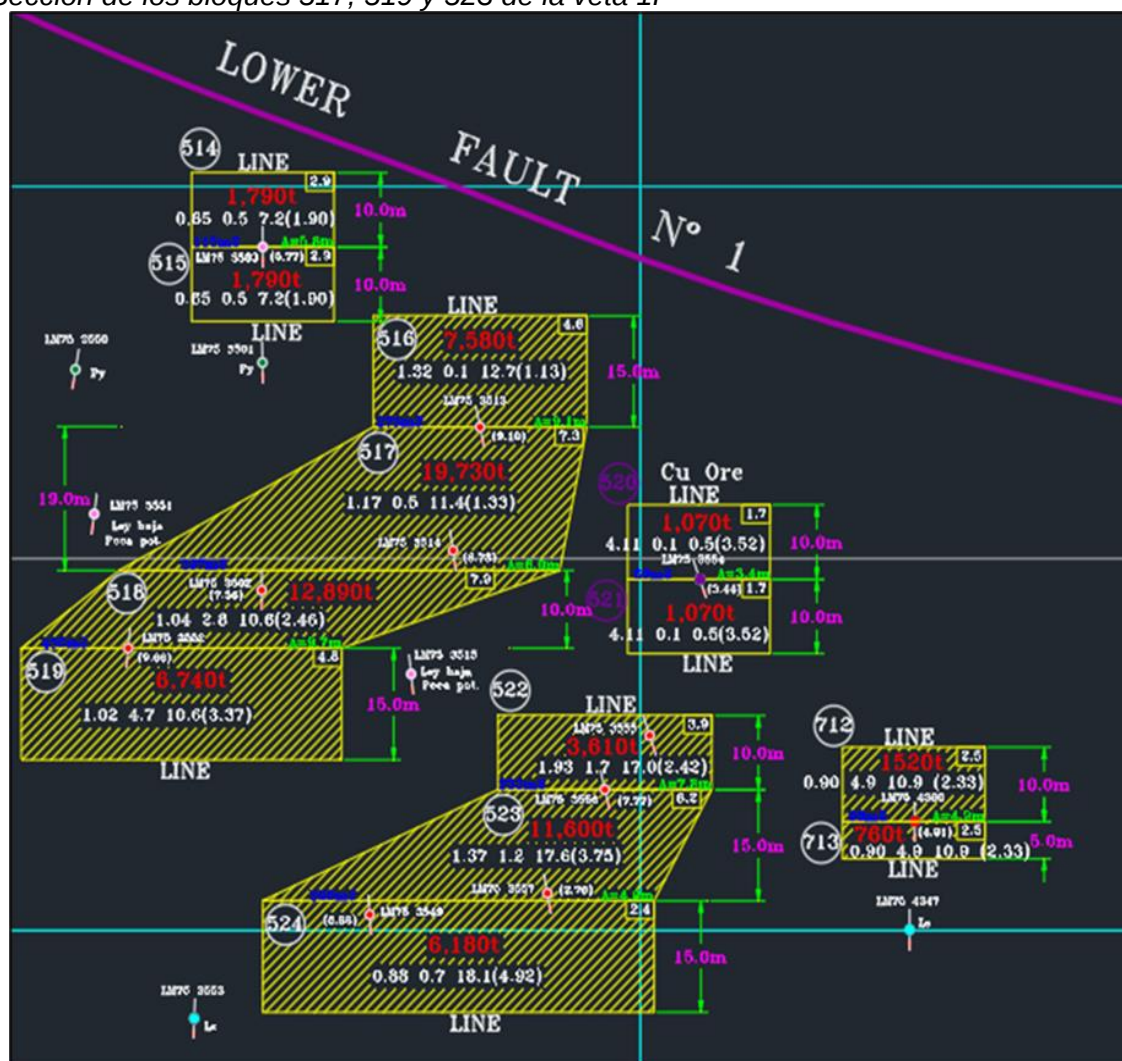
BLOCK	ANCHO (m)	VOLUMEN (m³)	MINERAL TIPO	RECURSOS (t)
517	7.3	6,366	Shiroji (3.1 t/m³)	19,730
519	4.8	2,174	Shiroji (3.1 t/m³)	6,740
523	6.2	3,741	Shiroji (3.1 t/m³)	11,600

Nota: Fuente elaboración propia

El total de recursos estimados en los tres bloques asciende a aproximadamente 38,000 toneladas métricas, representando un volumen de mineral significativo dentro de la estructura V1P.

Figura 14

Sección de los bloques 517, 519 y 523 de la veta 1P



Nota: Fuente elaboración propia

Los resultados obtenidos reflejan la variabilidad geométrica y volumétrica de la veta, destacando que el block 517 concentra el mayor potencial de recursos. Los valores aquí determinados constituyen la base para el análisis comparativo de densidades, leyes y dominios mineralógicos, los cuales serán empleados en la reclasificación de bloques en función de la identificación del cobre secundario.

3.3.3 *Inventario de reservas y recursos*

La siguiente tabla presenta el inventario de recursos estimados por cada bloque modelado, resultado del cálculo realizado en base a la mineralización de cobre primario. Los valores aquí mostrados provienen del procesamiento de los datos obtenidos a partir de las muestras y mediciones descritas en las secciones anteriores.

Tabla 11

Inventario de reservas y recursos

CLASE	ZONA	CATEGORÍA DE RECURSOS	NIVEL	LÍNEA	VETA	N°	COLOR	TIPO De MINERAL Cu (TMC)	RECURSOS (t)	ANCHO (m)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag (oz/t)	Σ
CONT.	PPF	INF	Z	-80	1PA	199	AM	P	820	1.3	2.12	0.8	11.1	3.12	17.13
CONT.	PPF	INF	Z	-80	1PA	200	AM	P	820	1.3	2.12	0.8	11.1	3.12	17.13
CONT.	PPF	INF	Y	-150	2T	379	AM	P	21,140	8.1	0.60	0.2	11.3	1.32	13.46
CONT.	PPF	INF	Y	-150	2T	380	AM	P	42,910	7.6	0.82	0.2	12.3	1.11	14.45
CONT.	PPF	INF	Y	-180	1PB	517	AM	P	19,730	7.3	1.17	0.5	11.4	1.33	14.40
CONT.	PPF	INF	Z	-140	1PB	519	AM	P	6,740	4.8	1.02	4.7	10.6	3.37	19.70
CONT.	PPF	INF	Z	-185	1PB	523	AM	P	11,600	6.2	1.37	1.2	17.6	3.75	23.88
									103,760						

Nota: Fuente elaboración propia

3.4 Modelamiento de bloques – cobre secundario

3.4.1 Cálculo de los blocks 379 y 380 de la V2T

En esta etapa del estudio, se presenta la reestimación de los blocks 379 y 380 de la veta V2T, incorporando la identificación y modelamiento del cobre secundario dentro del proceso de cubicación. A diferencia del cálculo original —realizado bajo la suposición de que la mineralización correspondía íntegramente a cobre primario—, en la presente evaluación se integra información mineralógica y geoquímica que evidencia la presencia significativa de fases supergénicas (como calcosina y covelina), lo que justifica una reclasificación parcial de los bloques y la actualización de los valores de volumen y tonelaje.

Los bloques fueron nuevamente cubrados mediante el software AutoCAD, aplicando los mismos criterios geométricos definidos en la metodología general, pero considerando ajustes en la interpretación estructural y en la delimitación de las zonas con cobre secundario enriquecido.

3.4.1.1 Medición de la superficie superior. La Tabla 12 presenta los valores obtenidos en la parte superior de los bloques, donde se determinaron el ancho horizontal (AVH), la longitud del tramo mineralizado y el área resultante.

Tabla 12

Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)

BLOCK	ARRIBA AVH (m)	ARRIBA LONGIT (m)	ARRIBA ÁREA (m²)
379	7.6	0.1	0.76
380	7.3	49.0	358

Nota: Fuente elaboración propia

Estas áreas fueron generadas a partir del nuevo modelo tridimensional, donde las zonas de cobre secundario se encuentran delimitadas con mayor precisión, producto de la reinterpretación de los sondeos y análisis de testigos mineralizados.

3.4.1.2 Medición de la superficie inferior. La Tabla 13 muestra las dimensiones correspondientes a la parte inferior de los bloques, aplicando el mismo criterio de medición y cálculo de área.

Tabla 13

Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)

BLOCK	ABAJO AVH (m)	ABAJO LONGIT (m)	ABAJO ÁREA (m ²)
379	7.3	49.0	358
380	6.8	46.0	311

Nota: Fuente elaboración propia

Las superficies inferiores muestran una geometría más regular y continua respecto a la zona superior, lo cual refleja la mayor homogeneidad de la mineralización secundaria dentro del dominio enriquecido.

3.4.1.3 Cálculo del volumen. El volumen total se determinó mediante la media de las áreas superior e inferior, multiplicada por la altura del bloque. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14, donde se aprecia el volumen efectivo de cada bloque.

Tabla 14

Cálculo del volumen de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)

BLOCK	$((A_s + A_i)/2)$	ALTURA (m)	VOLUMEN (m ³)
379	160.2	14.5	2,325
380	334.5	18.0	6,018

Nota: Fuente elaboración propia

El volumen calculado refleja la reducción del cuerpo mineralizado respecto a la estimación anterior, atribuida a la delimitación más precisa de las zonas de cobre secundario, las cuales presentan menor espesor pero mayor ley metálica.

3.4.1.4 Cálculo del tonelaje y recursos. El tonelaje y los recursos estimados fueron calculados a partir del volumen obtenido y la densidad aparente correspondiente al mineral tipo shiroji (3,1 t/m³). Los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 379 y 380 de la V2T (cobre secundario)

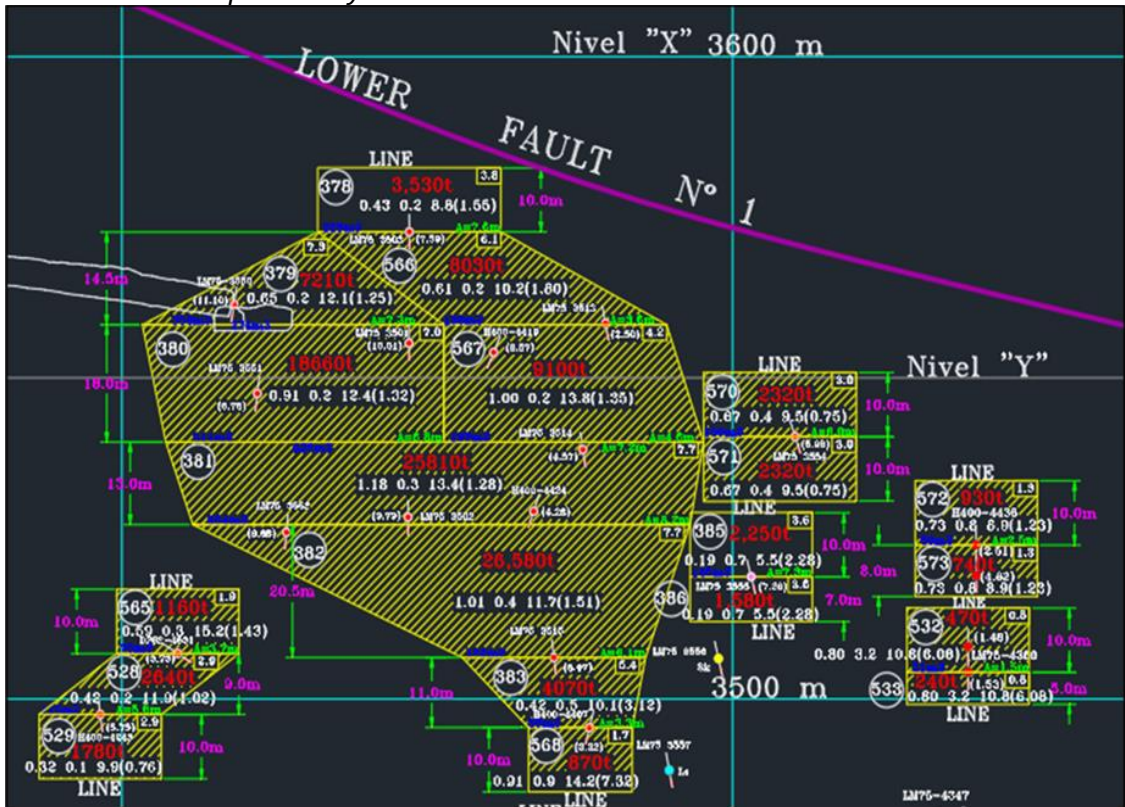
BLOCK	ANCHO (m)	VOLUMEN (m³)	MINERAL TIPO	RECURSOS (t)
379	7.3	2,325	Shiroji (3.1 t/m³)	7,210
380	7.0	6,018	Shiroji (3.1 t/m³)	18,660

Nota: Fuente elaboración propia

El block 380 presenta nuevamente un volumen y tonelaje mayor que el block 379, aunque la diferencia entre ambos se ha reducido al considerar únicamente la porción correspondiente a cobre secundario. Esta reclasificación permite identificar con mayor claridad las zonas potencialmente tratables mediante procesos hidrometalúrgicos, en contraposición a las zonas de cobre primario destinadas a flotación.

Figura 15

Sección de los bloques 379 y 380 de la veta V2T – cobre secundario



Nota: Fuente elaboración propia

En síntesis, la estimación 2025 evidencia un cambio sustancial en la distribución de los recursos dentro de la veta V2T, al diferenciar los bloques de cobre secundario respecto a los previamente catalogados como primarios. Esta actualización representa un

paso clave hacia la reclasificación integral de bloques cubicados, con el objetivo de mejorar la precisión del modelo de recursos y optimizar la selección del método de beneficio más adecuado para cada tipo de mineralización.

3.4.2 Cálculo de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P

En esta sección se presentan los resultados del modelamiento y cubicación de los blocks 517, 519 y 523 correspondientes a la veta V1P, bajo la reinterpretación mineralógica al cobre secundario.

Esta reevaluación forma parte del proceso de estimación 2025, orientado a actualizar los volúmenes y tonelajes mediante la diferenciación entre cobre primario y secundario, a fin de optimizar la representación del modelo de recursos.

3.4.2.1 Medición de la superficie superior. La Tabla 16 presenta los valores correspondientes a la parte superior de los bloques cubicados, incluyendo el ancho horizontal (AVH), la longitud mineralizada y el área calculada para cada bloque.

Tabla 16

Dimensiones y área de la parte superior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario)

BLOCK	ARRIBA AVH (m)	ARRIBA LONGIT (m)	ARRIBA ÁREA (m²)
517	9.1	17.0	155
519	8.4	30.0	253
523	7.8	30.0	233

Nota: Fuente elaboración propia

Las dimensiones fueron obtenidas a partir del análisis de las secciones proyectadas de perforación y controladas mediante los límites estructurales definidos para la zona de cobre secundario.

3.4.2.2 Medición de la superficie inferior. De manera análoga, la Tabla 17 muestra los resultados correspondientes a la parte inferior de los bloques, aplicando el mismo procedimiento de medición y cálculo de área.

Tabla 17

Dimensiones y área de la parte inferior de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario)

BLOCK	ABAJO AVH (m)	ABAJO LONGIT (m)	ABAJO ÁREA (m²)
517	9.1	17.0	155
519	LINE	LINE	LINE
523	7.8	30.0	233

Nota: Fuente elaboración propia

En el caso del block 519, los datos de la superficie inferior fueron inferidos en base a la continuidad estructural del modelo tridimensional, debido a la ausencia de registros directos en los sondeos correspondientes.

3.4.2.3 Cálculo del volumen. El volumen de cada bloque se obtuvo considerando el promedio de las áreas superior e inferior y la altura efectiva. Los resultados se presentan en la Tabla 18, donde se detalla el volumen calculado para cada bloque.

Tabla 18

Cálculo del volumen de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario)

BLOCK	$((A_s + A_i)/2)$	ALTURA (m)	VOLUMEN (m³)
517	155	5.0	774
519	126.5	10.0	1,266
523	233	5.0	1,166

Nota: Fuente elaboración propia

Los resultados muestran una mayor estabilidad volumétrica en el bloque 519, producto de su mayor extensión vertical, mientras que los bloques 517 y 523 presentan espesores moderados, característicos de cuerpos mineralizados con desarrollo limitado dentro del dominio secundario.

3.4.2.4 Cálculo del tonelaje y recursos. El tonelaje y la cantidad estimada de recursos se calcularon multiplicando el volumen de cada bloque por la densidad aparente del mineral tipo shiroji (3,1 t/m³). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19

Cálculo del tonelaje y recursos estimados de los blocks 517, 519 y 523 de la V1P (cobre secundario)

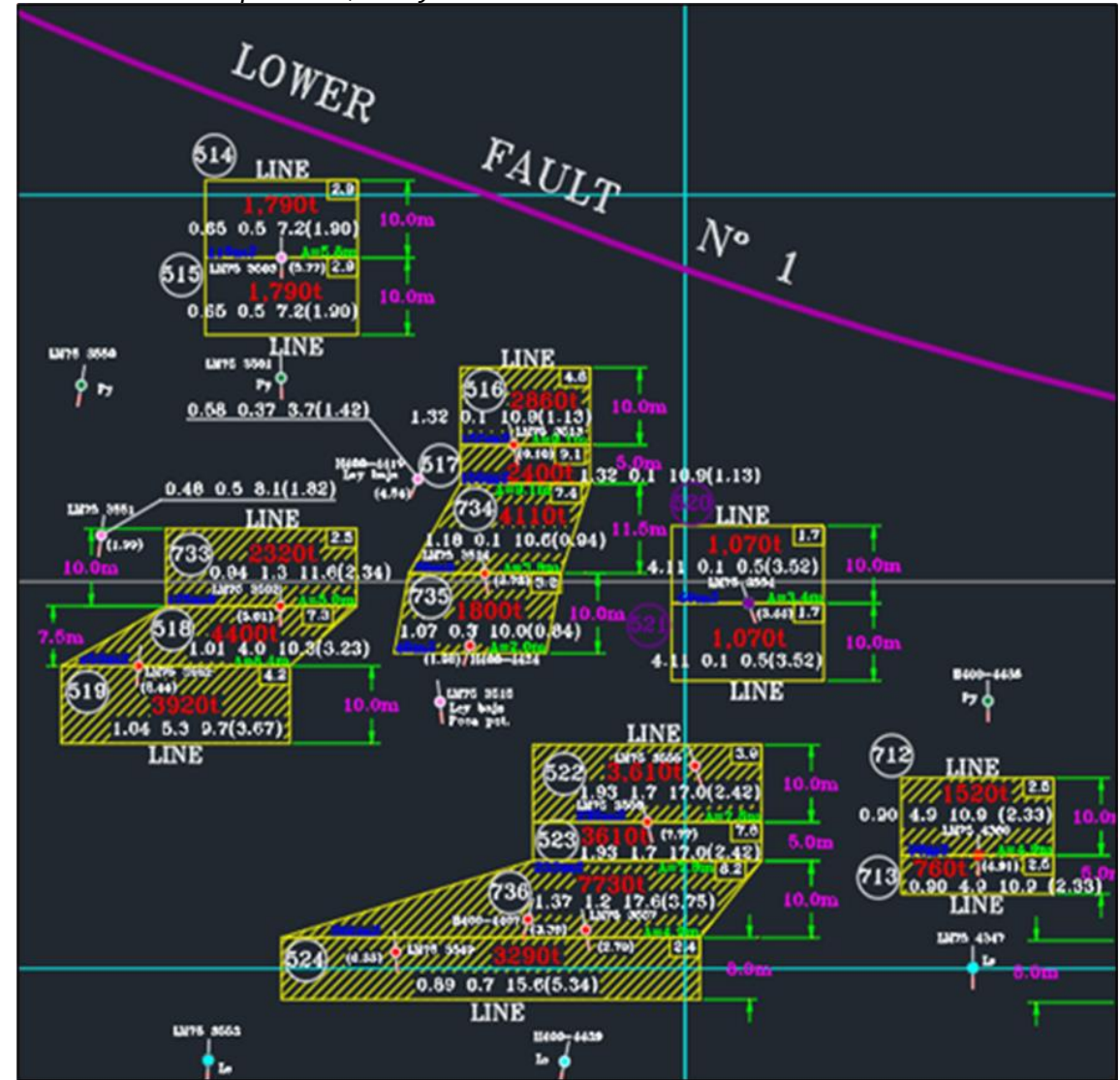
BLOCK	ANCHO (m)	VOLUMEN (m³)	MINERAL TIPO	RECURSOS (t)
517	9.1	774	Shiroji (3.1 t/m³)	2,400
519	4.2	1,266	Shiroji (3.1 t/m³)	3,920
523	7.8	1,166	Shiroji (3.1 t/m³)	3,610

Nota: Fuente elaboración propia

Los bloques analizados suman un total de 9,930 toneladas métricas de cobre secundario, destacando el block 519 como el de mayor contribución volumétrica.

Figura 16

Sección de los blocks 517, 519 y 523 de la veta 1P – cobre secundario



Nota: Fuente elaboración propia

En términos generales, la reestimación 2025 de la veta V1P evidencia una reducción en el volumen total respecto al modelo anterior, pero con una mayor representatividad metalúrgica, debido a la diferenciación entre dominios de cobre primario y secundario.

Esta actualización mejora la precisión del modelo de bloques y contribuye a la optimización de la planificación minera, permitiendo establecer estrategias diferenciadas de tratamiento según la naturaleza del mineral.

3.4.3 Influencia de la presencia de la falla

En la zona Z0 de la mina Huanzalá, ubicada entre las cotas 3,500 y 3,600 m s.n.m., se ha identificado una transición mineralógica significativa desde cobre primario hacia cobre secundario, asociada directamente a la presencia de una estructura de falla que atraviesa esta sección del yacimiento. Dicha estructura ha actuado como canal preferencial para la circulación de fluidos meteóricos y oxidantes, desempeñando un papel determinante en los procesos de alteración y enriquecimiento supergénico.

El cobre primario en Huanzalá se encuentra representado principalmente por calcopirita (CuFeS_2), producto de eventos hidrotermales de alta temperatura vinculados a intrusivos granodioríticos, los cuales dieron origen al sistema skarn característico del yacimiento. No obstante, la reactivación tectónica y la evolución hidrogeológica posterior favorecieron que la falla funcionara como una vía de ingreso para aguas meteóricas oxigenadas, modificando las condiciones geoquímicas del entorno mineralizado.

Al interactuar estas aguas oxidantes con los sulfuros primarios, se genera un proceso de oxidación y lixiviación que libera iones Cu^{2+} al medio. Estos iones, al desplazarse a través de zonas permeables, precipitan en condiciones más reductoras o estables, originando minerales secundarios de cobre tales como calcocita (Cu_2S), covelina (CuS), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y crisocola ($\text{Cu}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Este fenómeno corresponde al enriquecimiento supergénico, característico de la zona de oxidación de los cuerpos mineralizados.

La evidencia geológica recolectada entre 2018 y 2024 respalda esta interpretación. En los testigos de perforación analizados dentro de la zona Z0 se observan claras manifestaciones de minerales secundarios diseminados y una alteración hidrotermal retrógrada, confirmando el rol activo de la falla como agente de modificación post-mineral.

Como resultado, esta estructura no solo ha propiciado un cambio en la mineralogía del yacimiento, sino que también ha influido directamente en la reclasificación de los bloques mineralizados dentro de los modelos de cubicación correspondientes a los periodos 2024 y 2025. La presencia del cobre secundario, inducida por la acción de la falla, ha generado variaciones en la ley de cabeza, así como ajustes en las estrategias de procesamiento metalúrgico, reflejando su impacto tanto en la evaluación de recursos como en la planificación operativa de la mina.

3.4.4 *Inventario de reservas y recursos*

La siguiente tabla presenta el inventario de recursos estimados por bloque, resultado del cálculo realizado a partir de la mineralización de cobre secundario. Los valores mostrados corresponden al procesamiento y cubicación de los datos obtenidos mediante muestreo, análisis químico y modelamiento geométrico, desarrollados en las secciones anteriores.

Este inventario constituye una síntesis global de los recursos identificados durante la estimación 2025, reflejando la influencia de la reclasificación de bloques realizada con base en la identificación del cobre secundario. Los resultados permiten evaluar con mayor precisión el potencial económico del yacimiento y establecer criterios técnicos para la planificación minera y selección del método de beneficio más adecuado.

Tabla 20

Inventario de reservas y recursos – cobre secundario

CLASE	Zona	Categoría de Recursos	Nivel	Línea	Veta	No.	Color	Tipo de Mineral Cu (TMC)	Recursos (t)	Ancho (m)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag (oz/t)	Σ
NEW	PPF	INF	Z	-80	1PA	318	AM	S2	1,500	2.9	2.42	0.1	0.2	1.26	3.98
NEW	PPF	INF	Z	-80	1PA	319	AM	S2	1,500	2.9	2.42	0.1	0.2	1.26	3.98
NEW	PPF	INF	Z	-80	1PA	320	AM	S2	750	1.9	3.90	0.2	6.3	1.94	12.34
NEW	PPF	INF	Z	-80	1PA	321	AM	S2	1,000	1.9	3.90	0.2	6.3	1.94	12.34
CONT.	PPF	INF	Y	-150	2T	379	AM	S2	7,210	7.3	0.65	0.2	12.4	1.32	14.24
CONT.	PPF	INF	Y	-150	2T	380	AM	S2	18,660	7.0	0.91	0.2	12.4	1.32	14.84
CONT.	PPF	INF	Y	-180	1PB	517	AM	S2	2,400	9.1	1.32	0.1	10.9	1.13	13.45
CONT.	PPF	INF	Z	-140	1PB	519	AM	S2	3,920	4.2	1.04	5.3	9.7	3.67	19.70
CONT.	PPF	INF	Z	-185	1PB	523	AM	S2	3,610	7.8	1.93	1.7	17.0	2.42	23.07
									40,550						

Nota: Fuente elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de variación de recursos

Con base en los nuevos estudios realizados entre los años 2018 y 2024, que incluyeron la revisión detallada de testigos de perforación en la zona Z0 de la mina Huanzalá, se ha realizado una actualización del modelo geológico. Esta actualización se ve reflejada en la cubicación correspondiente al año 2025, en la cual se identificó un cambio mineralógico significativo: la presencia de cobre secundario (S2) en bloques previamente clasificados como cobre primario (P).

En la cubicación del año 2024, el modelo consideraba un total de 103,760 toneladas de recursos inferidos, todos correspondientes a cobre primario, en cambio, la cubicación del año 2025 mantiene el mismo volumen total, pero redistribuido en dos tipos de mineralización de cobre: 63,210 toneladas permanecen como cobre primario (P), mientras que 40,550 toneladas fueron reclasificadas como cobre secundario (S2). Esta reclasificación representa el 39.1 % del volumen total modelado.

Tabla 21: Variación de recursos

Variación de recursos

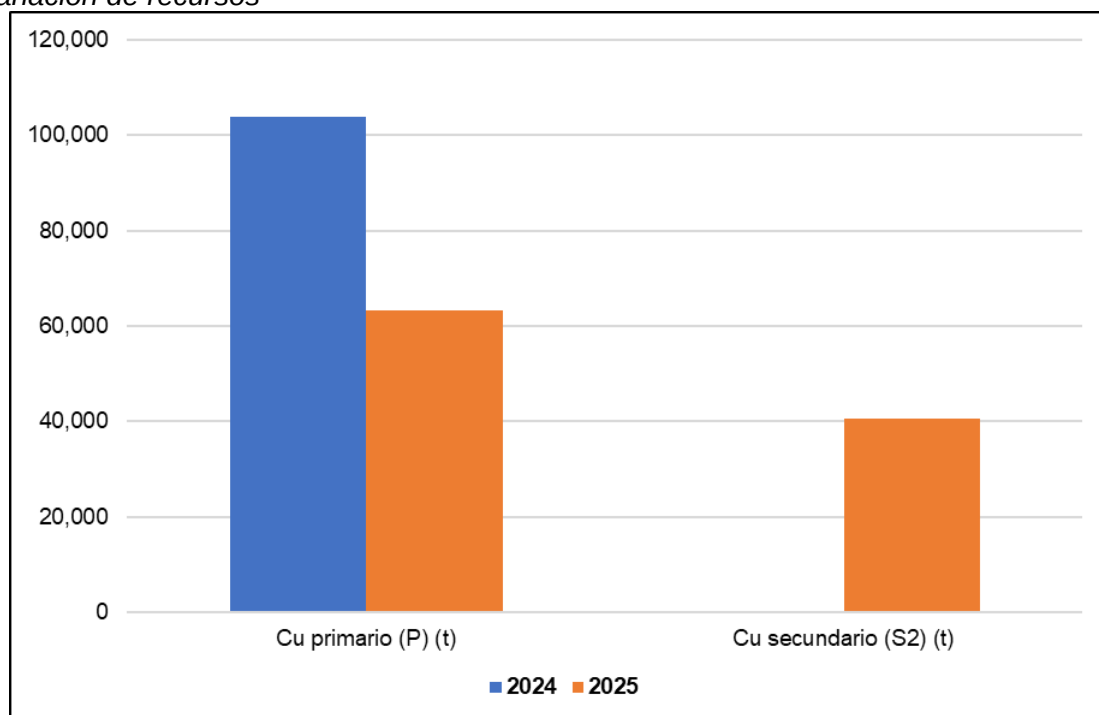
AÑO	TOTAL RECURSOS (t)	CU PRIMARIO (P) (t)	CU SECUNDARIO (S2) (t)
2024	103,760	103,760	0
2025	103,760	63,210	40,550

Nota: Fuente elaboración propia

Este cambio no implica una disminución de recursos, sino una mejora en la caracterización del tipo de mineralización, que tiene importantes implicancias tanto geológicas como operativas. La variación se resume en la siguiente tabla:

Figura 17

Variación de recursos



Nota: Fuente elaboración propia

4.2 Análisis de tipo de tratamiento

La actualización del modelo geológico entre las cubicaciones 2024 y 2025 no solo implicó una reclasificación de bloques de cobre primario (P) a cobre secundario (S2), sino también una mejora sustancial en la comprensión de la ley de cobre por volumen, esta información detallada permite realizar ajustes más precisos en la dosificación de reactivos durante el tratamiento metalúrgico, optimizando la eficiencia del proceso y reduciendo costos operativos.

Los minerales de cobre secundario, presentan un comportamiento diferente en comparación con minerales típicos del cobre primario, mientras que el cobre primario responde favorablemente a la flotación convencional con xantatos, los óxidos y sulfuros secundarios requieren frecuentemente pretratamiento con sulfidizantes, como NaHS o Na₂S, para que puedan ser recuperados mediante flotación, gracias a la mayor precisión en la estimación de la ley de cobre por metro cúbico (m³), es posible determinar con mayor exactitud la carga de mineral útil que ingresará al circuito de flotación, esta información permite:

- Ajustar la cantidad de colectores y espumantes según el tipo y la ley del mineral.
- Evitar sobredosificación de reactivos, lo cual reduce costos y minimiza efectos no deseados en el proceso.
- Mejorar la recuperación metalúrgica, al adaptar el tratamiento a la naturaleza real del mineral.
- Implementar circuitos diferenciados o estrategias de blending, según la proporción de óxidos o sulfuros en la alimentación.

En los bloques 318 a 321 de la zona Z0, línea –80, se identificó mineralización secundaria de cobre con leyes superiores al 3.90 % Cu y baja presencia de plomo y zinc, esta composición requiere menor uso de reactivos plumbíferos y una mayor proporción de sulfidizantes, con un pH de flotación ajustado al rango óptimo para óxidos. En consecuencia, la interpretación geológica actualizada no solo mejora la representación del yacimiento, sino que tiene un impacto directo sobre el diseño operativo del tratamiento, favoreciendo un uso racional de insumos, una mejor planificación de campañas de procesamiento y un incremento en la rentabilidad del recurso.

4.3 Análisis de costos

La correcta identificación del tipo de mineralización es fundamental para aplicar el tratamiento metalúrgico óptimo, en el caso de las 40,550 toneladas reclasificadas como cobre secundario (S2), no aplicar el proceso adecuado podría generar pérdidas importantes en la recuperación de Cu.

Tabla 22

Comparación de recuperaciones estimadas

TIPO DE TRATAMIENTO APLICADO	TIPO DE MINERAL	RECUPERACIÓN ESTIMADA DE Cu (%)
Proceso convencional (sin sulfidización)	Cobre secundario (S2)	45–60 %
Proceso adecuado (con sulfidización)	Cobre secundario (S2)	75–85 %

Nota: Fuente elaboración propia

Considerando una ley promedio de 2.5 % de Cu en un total de 40,550 toneladas de mineral tipo S2 (cobre secundario), se obtiene el siguiente balance metalúrgico y económico:

- Contenido total de cobre:

$$40,550 \text{ t} \times 2.5 \% = 1,013.75 \text{ toneladas de Cu contenido}$$

- Escenario 1 – Proceso adecuado (recuperación del 80 %):

$$\text{Cu recuperado} = 1,013.75 \times 0.80 = 811.0 \text{ toneladas de Cu metálico}$$

- Escenario 2 – Proceso inadecuado (recuperación del 55 %):

$$\text{Cu recuperado} = 1,013.75 \times 0.55 = 558.8 \text{ toneladas de Cu metálico}$$

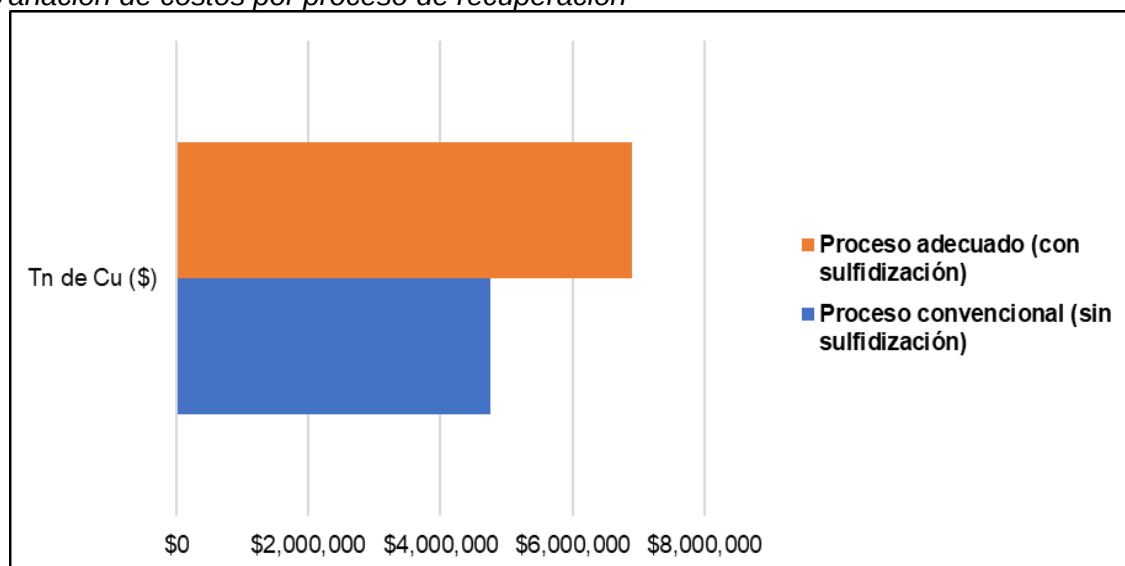
La diferencia entre ambos escenarios representa una pérdida de recuperación de 252.2 toneladas de cobre, atribuible a la aplicación de un método de procesamiento no óptimo para minerales secundarios.

Si se considera un precio promedio del cobre de USD 8,500 por tonelada, el valor económico de dicha pérdida sería:

$$252.2 \text{ t} \times \text{USD } 8,500 / \text{t} = \text{USD } 2,143,700$$

Figura 18

Variación de costos por proceso de recuperación



Nota: Fuente elaboración propia

4.4 Validación del modelo

En el presente estudio no se aplicó una validación cruzada geoestadística formal ni métricas estadísticas avanzadas (error medio, RMSE o cross-validation), debido a la ausencia de una base de datos digital continua y a la naturaleza determinística del método de cubicación por bloques empleado. No obstante, se realizó una validación operacional del modelo mediante la reconciliación entre los volúmenes y leyes estimadas y los resultados reales obtenidos durante la explotación minera.

La comparación entre el modelo cubicado y la producción real evidencia que aproximadamente el 80 % del material explotado corresponde a zonas previamente identificadas como mineralizadas, y que las leyes promedio obtenidas se encuentran dentro del rango esperado según la estimación realizada. Este nivel de concordancia es considerado aceptable para modelos determinísticos y métodos tradicionales de cubicación, especialmente en yacimientos con información histórica limitada o en etapas tempranas de desarrollo.

El análisis de error se abordó desde un enfoque comparativo, considerando la diferencia porcentual entre tonelajes estimados y reales, así como la variación entre leyes promedio estimadas y las obtenidas en planta. De manera general, el error global del modelo se mantiene dentro de rangos aceptables, validando su aplicación para fines de reclasificación de bloques.

Asimismo, se identificaron discrepancias puntuales entre la estimación y los resultados reales de explotación, atribuibles principalmente a la alta heterogeneidad del cobre secundario y a cambios locales asociados a estructuras geológicas y variaciones litológicas no completamente capturadas por el espaciamiento de muestreo. Estas diferencias no invalidan el modelo en su conjunto, sino que reflejan la necesidad de ajustes locales y actualización progresiva conforme se dispone de nueva información de producción.

Conclusiones

La coexistencia de minerales de cobre primario y secundario genera una marcada heterogeneidad mineralógica y metalúrgica dentro del yacimiento. Mientras los sulfuros dominan en zonas profundas, los óxidos y carbonatos de cobre se concentran en niveles superiores, afectando las leyes locales y el comportamiento en los procesos de recuperación. Esta variabilidad resalta la necesidad de diferenciar ambos tipos de mineralización para definir adecuadamente las rutas de procesamiento.

La presencia de cobre secundario asociado a la estructura de falla y a la alteración hidrotermal del tipo shiroji confirma la ocurrencia de un proceso de enriquecimiento supergénico posterior a la mineralización primaria. Este proceso ha concentrado el cobre secundario en sectores con mayor fracturamiento y permeabilidad, evidenciando un control estructural directo sobre la redistribución del metal.

Asimismo, la interacción entre la alteración shiroji y las estructuras de falla ha modificado la continuidad y geometría de los cuerpos mineralizados, influyendo directamente en la distribución del cobre. Por ello, la reinterpretación geológica y la actualización del modelo de bloques constituyen pasos fundamentales para mejorar la precisión en la estimación de recursos y optimizar la planificación minera del yacimiento Huanzalá.

La diferenciación del cobre secundario desarrollada en el presente estudio se realizó desde una perspectiva geológica y geométrica, orientada a la reclasificación de bloques previamente cubicados, sin integrar resultados de pruebas metalúrgicas tempranas debido a restricciones de acceso a información confidencial de la operación minera. Esta limitación no afecta la validez de los resultados obtenidos, dado que el objetivo de la investigación no fue evaluar recuperaciones metalúrgicas ni optimizar procesos de beneficio, sino analizar la continuidad y presencia del mineral desde el punto de vista del modelamiento.

La no inclusión de un análisis de sensibilidad sobre la variación de parámetros como ley, densidad y recuperación responde a la naturaleza y alcance del presente estudio, cuyo objetivo principal es la reclasificación relativa de bloques previamente cubrados a partir de la identificación del cobre secundario. Dado que dichos parámetros corresponden a valores operativos geológicamente validados y se aplican de manera consistente antes y después de la reclasificación, su variación no alteraría la clasificación de los bloques, sino únicamente los valores absolutos de tonelaje o contenido metálico. En un modelo determinístico basado en cubicación tradicional, la gestión de la incertidumbre se sustenta en la coherencia geológica y en la validación con producción real, más que en variaciones paramétricas teóricas. En consecuencia, la omisión del análisis de sensibilidad se reconoce como una limitación metodológica, cuya incorporación queda planteada para estudios futuros cuando se disponga de información digitalizada y bases de datos que permitan un análisis estadístico robusto de la variabilidad del yacimiento.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una caracterización mineralógica y metalúrgica diferenciada, mediante estudios petrográficos detallados y pruebas metalúrgicas específicas que permitan establecer con claridad el comportamiento del cobre primario y secundario. Esta diferenciación facilitará la definición de estrategias de procesamiento adecuadas y la selección del método metalúrgico más eficiente para cada tipo de mineralización. Así mismo se debe mejorar el control de la zonificación de cobre secundario buscando la presencia del cobre secundario oscuro “NeoTocita”.

Es necesario desarrollar un modelo estructural actualizado, integrando la falla principal y la alteración hidrotermal tipo shiroji dentro del modelo geológico tridimensional. Esta incorporación permitirá definir dominios geometalúrgicos independientes, mejorar la interpretación espacial de la mineralización y reforzar la coherencia entre la información geológica, geoquímica y de recursos.

Asimismo, se sugiere realizar una nueva cubicación por tipo de mineralización, recalculando los recursos de cobre primario y secundario de manera separada. Este enfoque permitirá reflejar las diferencias en leyes, continuidad geológica y potencial de recuperación metalúrgica, optimizando la estimación de recursos y la planificación de minado.

Finalmente, se recomienda ampliar el muestreo y ejecutar una campaña de perforación dirigida, enfocada en las zonas de transición entre cobre primario y secundario y a lo largo de la estructura de falla principal. Esta información adicional fortalecerá la interpretación genética del yacimiento y reducirá la incertidumbre en la estimación de recursos futuros. Así mismo, se debe considerar el tratamiento de relaves, que no tuvieron una buena recuperación del cobre, debido a los buenos precios de los metales en la actualidad.

Referencias bibliográficas

- Abzalov, M. (2016). *Applied mining geology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-1>
- Camus, F. (2003). *Geología de los yacimientos de cobre de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM). (2014). *CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves*. CIM Council, Canada.
- Copper Fox Metals Inc. (2020). *Technical Report and Updated Resource Estimate for the Van Dyke Copper Project, Gila County, Arizona, U.S.A.* Recuperado de <https://copperfoxmetals.com/site/assets/files/3942/van-dyke-ni43-101-report-final-04may20-signed.pdf>
- Coro Mining Corp / NCL Ingeniería y Construcción SpA. (2020). *Updated and Expanded Resource Estimate for the Marimaca Copper Project, Antofagasta Province, Region II, Chile*. Recuperado de <https://marimaca.com/wp-content/uploads/2020/12/20-1-17.pdf>
- Dimitrakopoulos, R. (Ed.). (2018). *Advances in applied strategic mine planning*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69320-5>
- Flores, L. (2015). *Influencia de la geoquímica de alteración supergénica en la distribución y estimación de leyes de cobre en la zona enriquecida de un yacimiento tipo pórfido* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Gómez, L. (2019). *Evaluación de metodologías tradicionales para la estimación de recursos en depósitos con cobre secundario en la región de Sonora, México* [Tesis de maestría, Universidad de Sonora].
- Gustafson, L. B., & Hunt, J. P. (1975). *The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile*. *Economic Geology*, 70(5), 857–912. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.857>

- Joint Ore Reserves Committee (JORC). (2012). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code 2012)*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- JORC. (2012). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code 2012)*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press.
- Miranda, J. (2018). *Metodología para la estimación y clasificación de recursos en depósitos de cobre con mineralización mixta (primaria y secundaria) en la región de Antofagasta, Chile* [Tesis doctoral, Universidad de Chile].
- Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC). (2017). *PERC Reporting Standard 2017: Pan-European Standard for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves*.
- Peters, E. J. (2013). *Hydrometallurgical processes for the treatment of copper ores*. Pergamon Press.
- Quispe, R. (2020). *Desarrollo de un modelo para la segregación de dominios mineralizados primarios y secundarios en un depósito de cobre estratoligado en Perú* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Rojas, M. (2021). *Optimización de la estimación de recursos en yacimientos con cobre secundario mediante ajuste de parámetros en modelos de bloques* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). *Mineral resource estimation*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-8821-1>
- Sánchez, P. (2012). *Evaluación de la incertidumbre en la estimación de recursos de cobre utilizando simulación condicional en depósitos con enriquecimiento supergénico* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].

- Sillitoe, R. H. (2005). *Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits*. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, & R. J. Goldfarb (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 723–768). Society of Economic Geologists.
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2002). *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.
- Vargas, E. (2017). *Aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la identificación y delimitación de zonas de mineralización secundaria en datos de exploración de cobre* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Walthier, P. (2012). *The mineral resource estimation guide*. CIM Publications.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Testigos de perforación – V2T 379	1
Anexo 2: Testigos de perforación – V2T 380	2
Anexo 3: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 517.....	5
Anexo 4: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 519.....	6
Anexo 5: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 523.....	7

Anexo 1: Testigos de perforación – V2T 379



Nota: Sondaje 3550

Anexo 2: Testigos de perforación – V2T 380



Nota: Sondaje 3501



Nota: Sondaje 3551



Nota: Sondaje 3554

Anexo 3: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 517



Nota: Sondaje 3514 - 1



Nota: Sondaje 3514 - 2

Anexo 4: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 519



Nota: Sondaje 3552

Anexo 5: Testigos de perforación – V1PB BLOCK 523



Nota: Sondaje 3555 - 1



Nota: Sondaje 3555 - 2



Nota: Sondaje 3556