

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**MODELAMIENTO Y CÁLCULO DE RECURSOS MINERALES DE LAS
VETAS VICTORIA Y MERCEDES EN LA ZONA DE PUYHUAN EN LA
UNIDAD CONSORCIO MINERO HORIZONTE – PARCOY – LA LIBERTAD**

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Autor:

Bach. Anabell Bianca Pinto Quispe

Asesor:

Mcs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca

Cajamarca – Perú

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

— FACULTAD DE INGENIERÍA —

1. Investigador : PINTO QUISPE, ANABELL BIANCA
DNI : 73121000
Escuela Profesional : INGENIERÍA GEOLÓGICA
2. Asesor : M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
Facultad : INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
5. Título de Trabajo de Investigación:
"MODELAMIENTO Y CÁLCULO DE RECURSOS MINERALES DE LAS VETAS VICTORIA Y MERCEDES EN LA ZONA DE PUYHUAN EN LA UNIDAD CONSORCIO MINERO HORIZONTE – PARCOY – LA LIBERTAD"
6. Fecha de evaluación: 11 DE FEBRERO DEL 2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 15%
9. Código Documento: trn:oid:::3117:555968190
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 12/02/2026

 FIRMA DEL ASESOR M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO DNI: 29552145	 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI
--	---



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0078-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **seis días del mes de marzo de 2026**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **MODELAMIENTO Y CÁLCULO DE RECURSOS MINERALES DE LAS VETAS VICTORIA Y MERCEDES EN LA ZONA DE PUYHUAN EN LA UNIDAD CONSORCIO MINERO HORIZONTE - PARCOY - LA LIBERTAD**, presentado por la Bachiller en Ingeniería Geológica **ANABELL BIANCA PINTO QUISPE**, asesorado por el M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 05.00 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11.00 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 16.00 PTS. *Dieciséis* (En letras)

En consecuencia, se la declara *APROBADA* con el calificativo de *Dieciséis* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *11.00 am* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

[Signature]
Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

[Signature]
Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

[Signature]
M. Cs. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario

[Signature]
M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, la salud, la sabiduría para superar cualquier obstáculo, y por todas las bendiciones que permite en mi vida. Detrás de cada logro, está él que lo hizo posible.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca y en especial a mi querida Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, a cada uno de los docentes por los conocimientos brindados durante toda nuestra etapa universitaria.

A mi asesor de tesis, el Mcs. Ing, Victor Arapa Vilca, por la confianza y apoyo en este camino, por sus consejos y por las enseñanzas. Del mismo modo a cada uno de mis colegas geólogos con los que tuve oportunidad de compartir experiencias y conocimientos.

A.B.P.Q.

DEDICATORIA

Dedicado a mi padre, Félix Pinto, por su amor, dedicación, por cada una de sus enseñanzas y consejos que siempre me ayudó a ser mejor. Por confiar en mí, enseñarme y ser ejemplo de que uno puede conseguir todo lo que se propone.

A mi madre, Luz Quispe, por su amor y apoyo incondicional, por ser una gran mujer y acompañarme en cada paso que doy, y siempre motivarme a seguir adelante.

A mis hermanos, Deymi, Angie y Fabricio, por su apoyo en todo momento, por ser mi fuerza para día a día luchar por mis objetivos y por siempre estar pendientes de mí.

A.B.P.Q.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA	ii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.....	3
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.....	3
2.1.3.	Antecedentes Locales	4
2.2.	BASES TEÓRICAS DE INVESTIGACIÓN	5
2.2.1.	Modelamiento Geológico	5
2.2.2.	Estimación de Recursos Minerales	6
2.2.3.	Recursos Minerales	7
2.2.4.	Categorización de Recursos Minerales.....	7
2.2.5.	Recurso Mineral Medido	9
2.2.6.	Recurso Mineral Indicado	10
2.2.7.	Recurso Mineral Inferido	10
2.2.8.	Factores que controlan la disponibilidad de los Recursos Minerales.....	11
2.2.9.	Reservas Minerales.....	13
2.2.10.	Factores que afectan a las Reservas Mineras.....	15
2.2.11.	Determinación de Reservas	16
2.2.12.	Propósitos del Cálculo de Reservas.....	17

	Pág.
2.2.13. Código JORC	18
2.2.14. Aplicaciones de Código	18
2.2.15. Depósitos Orogénicos	19
2.2.16. Batolito de Pataz	19
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	20

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.....	22
3.1.1. Ubicación Política	22
3.1.2. Ubicación Geográfica	22
3.1.3. Accesibilidad	23
3.2. PROCEDIMIENTOS.....	24
3.2.1. Etapa de Gabinete	24
3.2.2. Etapa de Campo	24
3.2.3. Etapa de Análisis e Interpretación.....	24
3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	25
3.3.1. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación.....	25
3.3.2. Población de Estudio	26
3.3.3. Muestra.....	26
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	26
3.4.1. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	26
3.5. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	27
3.6. GEOLOGÍA LOCAL.....	27
3.7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	34
3.8. CONTROL LITOLÓGICO DE VETAS VICTORIA Y MERCEDES	42
3.9. CONTROL ESTRUCTURAL DE VETAS VICTORIA Y MERCEDES....	45
3.10. CONTROL MINERALÓGICO.....	47
3.11. CONTROLES DE MINERALES DE ALTERACIÓN	48
3.12. DESCRIPCIÓN DE VETA VICTORIA Y MERCEDES	51

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.1.	Modelamiento Litológico	61
4.1.2.	Modelamiento Mineralógico.....	70
4.2.	CÁLCULO DE RECURSOS.....	71
4.2.1.	Modelo de Bloques como Fundamento para la Estimación	72
4.2.2.	Estimación de Recursos Minerales	72
4.2.3.	Validación y Clasificación de Recursos	72
4.2.4.	Consideraciones Técnicas	77
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
4.3.1.	Geometría y Continuidad de las Vetas	77
4.3.2.	Distribución de Mineralización	77
4.3.3.	Estimación de Recursos y su Confiabilidad	77
4.4.	CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	88

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	CONCLUSIONES	89
5.2	RECOMENDACIONES	90
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ANEXO 01:	94
Plano 01. Plano De Ubicación	94
Plano 02. Plano Litológico	94
Plano 03. Plano Metalogenético	94
Plano 04. Plano Geoquímico	94
ANEXO 2: PANEL FOTOGRÁFICO	98
ANEXO 3: AUTORIZACIÓN DE USO DE INFORMACIÓN	101

LISTA DE ABREVIATURAS

KE	:	Eficiencia de Kriging (Kriging Efficiency)
SoR	:	Pendiente de Regresión (Slope of Regression)
CO ₂	:	Dióxido de Carbono
UTM	:	Universal Transversal de Mercator
WGS84	:	World Geodetic System 1984
Senamhi	:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
K-Ar	:	Datación potasio-argón
Aprox	:	Aproximadamente
MA	:	Millones de Años
INGEMMET	:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
CMH	:	Consorcio Minero Horizonte

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas UTM Sistema WGS84.	22
Tabla 2. Accesibilidad para la investigación.....	23
Tabla 3. Criterios para la clasificación de recursos minerales	80
Tabla 4. Clasificación de recursos minerales de la veta Victoria.	82
Tabla 5. Clasificación de recursos minerales de la veta Victoria Techo.	84
Tabla 6. Clasificación de recursos minerales de la veta Mercedes.	86
Tabla 7. Resumen de la clasificación de los recursos minerales, para las Vetas Victoria, Victoria Techo y Veta Mercedes	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Clasificación de reservas y recursos	9
Figura 2: Esquema técnico sobre la categorización de los hallazgos mineros, donde la determinación de recursos minerales depende de un nivel en aumento de conocimientos geológicos y confianza. Los recursos minerales se organizan en una jerarquía de tres niveles según la solidez de la evidencia científica: los inferidos, que representan el grado más bajo de conocimiento; los indicados, con una base de datos más robusta; y finalmente los medidos, que ofrecen la mayor certidumbre técnica	15
Figura 3. Acceso terrestre desde Trujillo para llegar a la zona de Puyhuan perteneciente a la Concesión Minera Acumulación Parcoy N°1	23
Figura 4. Edades aproximadas de mineralización y batolito de Pataz, realizadas por Haberlin Et al. 2002	31
Figura 5. Columna Litoestratigráfica de la Región de Pataz, se enmarca de azul la cronología de las estructuras mineralizadas de la zona de Puyhuan perteneciente a la Concesión Minera Acumulación Parcoy N°1	32
Figura 6. Vista transversal de las vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan	33
Figura 7. Comportamiento estructural del yacimiento orogénico en CMH	36
Figura 8. Sistema Estructural de las Vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan	46
Figura 9. Control mineralógico y de alteración de las vetas Victoria y Mercedes	50
Figura 10. Sistema de Vetas Victoria y Victoria Techo	55
Figura 11. Sección transversal de la proyección de la Veta Mercedes en la zona de Puyhuan	59
Figura 12. Proyección de Veta Mercedes - Vista en Planta	60
Figura 13. Se observa la veta Victoria de color rojo realizada desde el mapeo litológico y de amarillo se presenta los puntos de muestreo geoquímico para esta estructura	62
Figura 14. Proceso utilizado para realizar el modelo geológico tridimensional	64

	Pág.
Figura 15. Vista tridimensional al norte de la veta Victoria Techo (de color rojo)	65
Figura 16. Vista al oeste de la veta Victoria Techo (de color rojo)	66
Figura 17. Vista tridimensional al Oeste de la veta Mercedes (de color rojo)	67
Figura 18. Vista al oeste de las vetas Victoria Techo (izquierda) y Mercedes (derecha), ambas representadas de color rojo	68
Figura 19. La imagen muestra un modelo tridimensional, donde se representan tres vetas mineralizadas principales: Veta Mercedes, Veta Victoria, y Veta Victoria Techo	69
Figura 20. Proceso utilizado para la estimación de recursos minerales	71
Figura 21. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Victoria: rojo (recurso medido), amarillo (indicado), verde (inferido) y celeste (no clasificado). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso	74
Figura 22. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Mercedes: rojo (recurso medido), amarillo (indicado) y verde (inferido). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso	75
Figura 23. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Victoria Techo: rojo (recurso medido), amarillo (indicado), verde (inferido) y celeste (no clasificado). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso	76
Figura 24. Configuración para la clasificación de recursos minerales en la estimación	79

	Pág.
Figura 25. Reporte de recursos minerales de la Veta Victoria	81
Figura 26. Reporte de recursos minerales veta Victoria Techo	83
Figura 27. Reporte de recursos minerales de la veta Mercedes	85

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Acuñaamiento de estructura mineralizada por falla longitudinal subparalela a la veta Victoria.	39
Fotografía 2. Desplazamiento de 40 cm de la Veta Mercedes (rojo) afectada por una falla inversa de alto ángulo.	41
Fotografía 3. Roca granodiorita como control litológico de la zona de Puyhuan.	44
Fotografía 4. Control mineralógico de las vetas Victoria y Mercedes, emplazamiento de cuarzo y pirita.	48
Fotografía 5. Veta de Cuarzo blanco – gris y parches de pirita.	53
Fotografía 6. Veta de cuarzo blanco y gris con mineralización de pirita y galena en parches.	57
Fotografía 7. Levantamiento topográfico de labores en la zona de Puyhuan desde la cota 2780 m.s.n.m. hasta los 3300 m.s.n.m.	99
Fotografía 8. Cartografiado geológico en el Nivel 2900 de Puyhuan.	99
Fotografía 9. Muestreo y caracterización mineralógica en el Nivel 3100 de Puyhuan.	100
Fotografía 10. Cartografiado geológico en el Nivel 3100 de Puyhuan.	100

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la zona de Puyhuan, dentro de la concesión minera de Consorcio Minero Horizonte, ubicada en el distrito de Parcoy, provincia de Pataz, región La Libertad. El objetivo principal fue modelar geológicamente y calcular los recursos minerales de las vetas Victoria y Mercedes, localizadas dentro del batolito de Pataz. Se realizó mapeo geológico detallado a escala 1:250 en labores subterráneas, muestreo de canal, levantamientos topográficos y análisis litológico y de alteración. La información fue procesada en gabinete usando AutoCAD y Leapfrog Geo, permitiendo generar modelos geológicos tridimensionales. A partir del modelo de bloques, se llevó a cabo la estimación de recursos empleando técnicas geoestadísticas como kriging ordinario, evaluando indicadores de confiabilidad como el Kriging Efficiency (KE) y el Slope of Regression (SoR). Como resultado, se concluye que el modelamiento geológico sirvió como base para interpolar leyes de oro y estimar recursos minerales. La información obtenida a partir del mapeo y el muestreo fue fundamental para comprender el contexto geológico y establecer controles de mineralización. Asimismo, se demostró que con la aplicación de método Kriging al modelo de bloques 3D para estimar leyes de oro y tonelaje, se estimó 115,591.98 toneladas con leyes entre 2.56 y 15.31 g/t Au. Los recursos se clasificaron como Medidos, Indicados e Inferidos según el Código JORC, permitiendo una evaluación más realista del potencial económico del yacimiento.

Palabras Clave: Modelamiento, Estimación, Recursos Minerales, Categorización de Recursos Minerales, Muestreo Geológico, Geoestadística.

ABSTRACT

The research was conducted in the Puyhuan area, within the Consorcio Minero Horizonte mining concession, located in the district of Parcoy, Pataz province, La Libertad region. The main objective was to geologically model and calculate the mineral resources of the Victoria and Mercedes veins, located within the Pataz batholith. Detailed geological mapping at a 1:250 scale was carried out in underground workings, along with channel sampling, topographic surveys, and lithological and alteration analyses. The data was processed in the office using AutoCAD and Leapfrog Geo, allowing the generation of three-dimensional geological models. From the block model, resource estimation was performed using geostatistical techniques such as ordinary kriging, evaluating reliability indicators such as Kriging Efficiency (KE) and Slope of Regression (SoR). The results show that the geological modeling served as a basis for interpolating gold grades and estimating mineral resources. The information obtained from mapping and sampling was fundamental to understanding the geological context and establishing mineralization controls. Furthermore, it was demonstrated that by applying the Kriging method to the 3D block model to estimate gold grades and tonnage, 115,591.98 tons were estimated with grades between 2.56 and 15.31 g/t Au. The resources were classified as Measured, Indicated, and Inferred according to the JORC Code, allowing for a more realistic assessment of the deposit's economic potential.

Keywords: Modeling, Estimation, Mineral Resources, Mineral Resource Categorization, Geological Sampling, Geostatistics.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Un recurso mineral constituye una acumulación natural en la corteza terrestre que, debido a sus propiedades físicas y químicas, posee un valor económico potencial para la sociedad. Para que un hallazgo sea definido técnicamente como recurso, no basta con su presencia física; debe demostrarse, mediante evidencia geológica directa y conocimientos técnicos especializados, que su ubicación, volumen y calidad presentan perspectivas razonables para una futura extracción rentable. Esta clasificación se divide en tres niveles que reflejan el grado de confianza sobre el yacimiento: los recursos inferidos, que se basan en suposiciones geológicas con bajo nivel de certeza; los indicados, que cuentan con datos suficientes para una evaluación preliminar de viabilidad; y los medidos, que poseen una precisión tan alta que permiten una planificación minera detallada, estableciendo así una jerarquía basada en la reducción de la incertidumbre técnica.(Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, 2018)

Consorcio Minero Horizonte, es una de las principales empresas mineras productoras de oro en el distrito de Pataz, cuyo yacimiento es de tipo orogénico emplazado en el batolito de Pataz, el cual es encajante de las vetas auríferas a lo largo de la cordillera oriental.

En la parte alta de la zona de Puyhuan se ha explorado y se ha identificado estructuras mineralizadas, de las cuales se va a realizar el modelamiento geológico y estimación de recursos usando el software Leapfrog Geo, en las vetas Mercedes y Victoria de este sector; lo que tiene por finalidad aumentar los recursos para Consorcio Minero Horizonte y contribuir a extender la vida útil de la mina.

El trabajo de exploración que se realiza en la zona de Puyhuan consiste en la toma de datos geoquímicos, levantamiento topográfico, mapeo geológico y mapeo estructural en las labores de los niveles 2870 msnm hasta 3300 msnm. Con toda la información recopilada se realizará la interpretación geológica y se efectuará el modelamiento y cálculo de recursos.

En consideración a ello, se plantea la interrogante: ¿Cuál es la estimación de recursos minerales en la zona Puyhuan a partir del modelo geológico de las vetas Victoria y Mercedes en Consorcio Minero Horizonte?

El estudio tiene como finalidad realizar el modelamiento geológico y cálculo de recursos de las vetas Victoria y Mercedes en la zona Puyhuan; en base a ello se formula la siguiente hipótesis: El modelamiento geológico mediante levantamiento de información topográfica y geológica con datos estructurales, mineralógicos y litológicos; mediante la aplicación de modelamiento 3D usando el software Leapfrog Geo nos ayudará a determinar el cálculo de recursos minerales en las vetas Victoria y Mercedes en la zona Puyhuan en el distrito minero de Parcoy.

El resultado de esta investigación permitirá conocer los potenciales recursos minerales de las vetas Victoria y Mercedes, lo cual servirá para futuros trabajos de exploración y explotación en este sector dentro de las concesiones de Consorcio Minero Horizonte y para los siguientes estudios a niveles inferiores.

El objetivo principal de esta investigación es: Determinar el modelamiento geológico para el cálculo de recursos minerales potenciales de la veta Victoria y Mercedes en la zona Puyhuan – Retamas – La Libertad. Para lo cual se planteó los siguientes objetivos específicos: Realizar mapeo geológico en las labores de los niveles del 2870 hasta los 3300 m.s.n.m. en la zona Puyhuan a escala 1/250, realizar el modelamiento geológico de las vetas Victoria y Mercedes en la zona Puyhuan y realizar el cálculo de recursos minerales en la zona Puyhuan.

La investigación se divide en V capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el Capítulo I, Introducción; se describe el planteamiento y formulación del problema, la justificación de la investigación y los objetivos. En el Capítulo II, Marco Teórico se especifica los antecedentes de la investigación, el marco y bases teóricas, así como también la definición de términos básicos. En el Capítulo III, Materiales y Métodos, se describe la ubicación geográfica y política del proyecto, la accesibilidad, el procedimiento y metodología utilizada. En el Capítulo IV, Análisis y discusión de resultados, se explica todos los resultados obtenidos a partir de la información tomada y procesada, y se realiza la constatación de la hipótesis. Y finalmente en el Capítulo V, se presenta las conclusiones basadas en los objetivos planteados y las recomendaciones para futuros trabajos de exploración.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Leach (2003) En su informe: Modelado tridimensional y estimación de recursos de vetas epitermales de oro y plata: yacimiento Cerro Vanguardia, Argentina. Esta tesis desarrolló un modelo tridimensional de vetas epitermales de alta sulfuración en el depósito Cerro Vanguardia (Argentina), usando herramientas de interpretación geológica asistida por software. Se enfocó en la estimación de recursos auríferos y argentíferos mediante técnicas geoestadísticas avanzadas, especialmente kriging ordinario y simulación secuencial.

Furtado (2014). Modeló un depósito aurífero orogénico en el distrito Zapucay, Uruguay, destacando la importancia del control estructural en la geometría de las vetas. Concluyó que el modelamiento geológico es una herramienta fundamental para optimizar la exploración subterránea al definir con precisión los volúmenes mineralizados.

Rossi (2014). Plantearon indicadores de validación geoestadística como KE y SoR dentro de modelos de recursos. Concluyen que estos indicadores cuantitativos son clave para clasificar recursos según estándares internacionales como JORC, mejorando la transparencia y precisión del modelo de bloques.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Alva (2019). En su tesis “Modelamiento geológico para el cálculo de recursos mineros de la veta Murciélago de la Mina Paredones, Chilete”, determinó que la elaboración del modelo geológico permitió estimar los recursos mineros de la veta murciélago en el nivel 4 y 5 de la Mina Paredones. Con estos datos se realizó la estimación del tonelaje de Pb, Zn y Ag en las

87 400.36 TM de mineral de recurso minero. En Pb se tiene 4 465.40 TM, en Zn se tiene 6 123.41 TM y en Ag se tiene 629 920.09 onzas.

Sánchez (2018), en su tesis “Análisis de factores que influyen en la estimación de reservas probadas y probables en la Unidad Operativa Pallancata”. Concluyo que, al analizar los recursos reportados por el modelamiento, solo el 50% del total de recursos llegan a ser reservas probadas y probables. Lo que está sujeto a mayor variabilidad es la cotización de Ag y Au y los costos de operación por lo que recomienda realizar estudios de tendencia y proyecciones.

Gonzales (2020). Modeló la veta Rayo en Yauliyacu, concluyendo que la geoestadística aplicada al modelo de bloques brinda mayor confiabilidad para evaluar el potencial económico del yacimiento y sustentar decisiones operativas.

2.1.3. Antecedentes Locales

Chacón (2017) en su tesis: Estimación de recursos minerales de las vetas La Lechera y La Negrita, Unidad Minera Santa Rosa – La Libertad. Se realizó la interpretación estimar los recursos minerales de dos vetas auríferas en la Unidad Minera Santa Rosa. Se realizó un levantamiento geológico detallado, seguido por modelamiento 3D en Surpac, integrando registros de perforación y muestreo de canales. La estimación de recursos se basó en el método de sección longitudinal combinado con kriging ordinario, dentro de un modelo de bloques. Se clasificaron los recursos en categorías según el Código JORC y se destacó la influencia del control estructural y litológico en la geometría vetiforme.

Obregón (2019) en la tesis: Evaluación y modelamiento geológico de las vetas del sector San Juan, Unidad Minera Consorcio Minero Horizonte – Parcoy. La cual consistió en la caracterización estructural, geológica y espacial de las vetas mineralizadas del sector San Juan, ubicado dentro de la Unidad Minera del Consorcio Minero Horizonte. El enfoque principal fue el modelamiento geológico tridimensional (3D) de las vetas, seguido de una estimación de recursos minerales en base a sondajes diamantinos subterráneos, muestreo de interior mina y análisis geoquímicos.

Coba (2017). EL Gigante, un yacimiento orogénico: nuevos datos, logros y perspectivas de la exploración. Minera Aurífera Retamas S.A. (Marsa), Pataz, La Libertad, Perú. El estudio se desarrolló en el yacimiento aurífero “El Gigante”, localizado dentro del Batolito de Pataz. Se evaluaron características geológicas, estructurales y metalogenéticas del depósito, identificando vetas orogénicas de alto ángulo con presencia predominante de cuarzo, sulfuros y mineralización aurífera de alto tenor. Esta tesis corrobora la importancia del control estructural y del modelamiento tridimensional en vetas del Batolito de Pataz, aportando información directa que fortalece la validación geológica y la aplicación de métodos geoestadísticos para mejorar la confiabilidad de los recursos estimados.

2.2. BASES TEÓRICAS DE INVESTIGACIÓN

2.2.1. Modelamiento Geológico

La evaluación de un depósito mineral implica dos aspectos fundamentales: el modelado geológico y la estimación de los Recursos Minerales, con el objetivo primordial de calcular la cantidad de metal presente en el depósito. El modelo geológico del depósito debe reflejar su contexto geológico específico. La cuantificación del metal puede realizarse mediante métodos convencionales o geoestadísticos. La estimación de los Recursos Minerales se basa en la interpretación geológica del depósito, respaldada por la información recopilada en el terreno. Esta información se utiliza para desarrollar el modelo geológico del depósito.

La creación del modelo geológico se fundamenta en datos obtenidos en el campo, como mapeos geológicos y registros de perforación con diamantina. Este proceso implica que un geólogo especializado en el tipo de depósito a evaluar realice la interpretación geológica correspondiente. (Gonzales, 2020)

Un modelo geológico es la recopilación y organización de toda la información geológica disponible en un momento dado, así como de observaciones y estudios, con el fin de presentar y explicar estas observaciones desde una perspectiva tanto empírica como genética. Los modelos geológicos son herramientas sumamente útiles tanto para orientar la exploración a gran escala como para proporcionar un control más preciso en la evaluación de recursos y en las operaciones mineras. La información geológica y su interpretación son la base de los procesos de evaluación y son fundamentales para la estimación y la extracción de recursos minerales. (Furtado, 2014)

Rossi y Deutsch (2014) indican que un método convencional para desarrollar un modelo geológico implica interpretar las características geológicas en secciones transversales y mapas en planta, para luego extender estas interpretaciones a volúmenes tridimensionales. Esta interpretación y modelado se basan en datos y conocimientos geológicos generales, considerando el tipo de depósito mineral. A menudo, estas interpretaciones son preferibles debido a su singularidad y facilidad de gestión, aunque a veces su construcción puede resultar complicada y requerir mucho tiempo. Para que las formas geológicas interpretadas sean precisas, es crucial contar con una cantidad adecuada de datos de perforación y otros conocimientos geológicos, como el mapeo de superficie y la información estructural. Los "wireframes" se emplean para definir los volúmenes tridimensionales correspondientes a una variable geológica.

2.2.2. Estimación de Recursos Minerales

La evaluación de Recursos Minerales es de gran importancia para las empresas mineras, ya que es crucial para llevar a cabo estudios de viabilidad de proyectos futuros o para las operaciones en curso de una mina. Las empresas buscan tomar decisiones de inversión y operativas sólidas basadas en los resultados del modelo de bloques, el cual debe ser fiable, pertinente y transparente. La calidad de los datos está estrechamente relacionada con la calidad de la estimación de Recursos; una recopilación deficiente, almacenamiento y manipulación de la base de datos puede ocasionar problemas significativos en los resultados esperados. (Gonzales, 2020)

Alfaro (2007) indica que los enfoques tradicionales para estimar los Recursos son principalmente empíricos y se centran demasiado en aspectos geométricos, sin considerar adecuadamente la estructura del depósito mineral. Por esta razón, la geoestadística, que se define como la aplicación de la teoría de variables regionalizadas, está adquiriendo mayor importancia. Una variable regionalizada se refiere a una función que representa la variabilidad espacial de una determinada magnitud asociada a un fenómeno natural, como, por ejemplo, la ley de un mineral, el espesor de una veta, la densidad de la roca, entre otros.

2.2.3. Recursos Minerales

Los recursos minerales se definen como la presencia o concentración de sustancias sólidas de valor económico en la corteza terrestre, en cantidades y formas que permitan su extracción rentable. La determinación de su ubicación, cantidad, calidad, continuidad y otras características geológicas se realiza mediante el análisis de datos y evidencia geológica específica, que incluye el proceso de muestreo. (Committee, 2012)

Así mismo, Ruiz (2010) se refiere a los recursos minerales como volúmenes de minerales con su correspondiente contenido metálico, los cuales han sido evaluados mediante técnicas de muestreo en la superficie o en el subsuelo, como sondeos, trincheras, excavaciones o perforaciones, y que pueden representar geoestadísticamente la presencia de un yacimiento mineral.

Oyarzun (2011) divide a los recursos minerales en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos, en orden ascendente de confiabilidad geológica. En relación con los Recursos No Descubiertos, esta clasificación abarcará las siguientes circunstancias.

Recursos No Descubiertos “Hipotéticos”, estos recursos son los que se pueden anticipar en una región ya identificada, en condiciones geológicas previamente estudiadas.

Recursos No Descubiertos “Especulativos”, Estos recursos pueden estar presentes tanto en forma de:

- Tipos de depósitos que ya se conocen en un contexto geológico propicio.
- Tipos de depósitos que aún no han sido identificados como tales, pero que están en proceso de ser reconocidos.

2.2.4. Categorización de Recursos Minerales

La geoestadística constituye una herramienta fundamental en la estimación de recursos minerales, ya que permite modelar rigurosamente la distribución espacial de variables como leyes de mineral y densidad. En este contexto, el kriging es el método de estimación más utilizado, al proporcionar valores óptimos y mínimamente sesgados, junto con una medida de incertidumbre asociada. De este enfoque se derivan indicadores estadísticos como el Kriging Efficiency (KE) y el Slope of Regression (SoR), que permiten evaluar cuantitativamente la confiabilidad del modelo geoestadístico (Rossi & Deutsch, 2014).

El Kriging Efficiency (KE) es un indicador geoestadístico que evalúa la eficiencia del kriging al estimar valores en comparación con la variabilidad natural de los datos. Se interpreta como la proporción de la varianza total que ha sido explicada por el modelo. Un KE cercano a 1 (o 100%) indica una alta eficiencia y confianza en la estimación, mientras que valores bajos sugieren que el modelo no captura adecuadamente la estructura espacial del depósito. Este parámetro se utiliza como guía para clasificar zonas con mayor o menor confiabilidad, siendo útil para diferenciar bloques que pueden ser considerados como recursos indicados o medidos frente a aquellos que deben mantenerse como inferidos debido a su mayor incertidumbre.

Por su parte, el Slope of Regression (SoR) es otro indicador geoestadístico fundamental que cuantifica el sesgo en la estimación. Se obtiene como la pendiente de la regresión lineal entre los valores estimados por kriging y los valores reales (conocidos o simulados). Un SoR igual a 1 implica una estimación sin sesgo, mientras que desviaciones significativas indican que el modelo tiende a sobrestimar o subestimar los valores reales. El SoR complementa al KE al proporcionar una evaluación de la fidelidad estadística global del modelo.

Como afirman Rossi y Deutsch (2014) Ambos indicadores forman parte del proceso de validación geoestadística de un modelo de recursos minerales. Su aplicación garantiza que la categorización de los recursos (inferido, indicado, medido) no sea solo el resultado de una interpretación cualitativa, sino que se base en criterios objetivos, reproducibles y cuantificables. De esta manera, KE y SoR se han consolidado como herramientas técnicas indispensables en software geoestadísticos como Leapfrog Edge, Isatis, Surpac, entre otros, alineándose con las mejores prácticas internacionales en estimación de recursos, como lo establece el Código JORC (2012).

PRODUCCIÓN ACUMULADA	RECURSOS IDENTIFICADOS			RECURSOS NO IDENTIFICADOS	
	DEMOSTRADOS		INFERIDO	RANGO DE PROBABILIDAD	
	MEDIDO	INDICADO		HIPOTÉTICO	ESPECULATIVO
ECONÓMICO	← Reservas			Conocimiento geológico Geología "Creativa" Recursos	
MARGINALMENTE ECONÓMICO	Reserva Base				
SUBECONÓMICO					
Otras ocurrencias	Incuye materiales no convencionales y de baja calidad				

Figura 1: Clasificación de reservas y recursos
Fuente: USGS (2011), Modificado por Roberto Oyarzun 2011.

2.2.5. Recurso Mineral Medido

Es aquel Recurso Mineral cuyas características físicas como tonelaje, ley, densidad, forma, tamaño y otras pueden ser estimados con un alto grado de certeza. Se fundamenta en información de exploración, muestreo y análisis que es detallada y confiable, obtenida a través de técnicas apropiadas en lugares como afloramientos, trincheras, tajos, labores y sondajes. Los lugares de la toma de información (muestreo mediciones y otros), están lo suficientemente próximos como para validar una continuidad geológica y de ley.

Un yacimiento que ha sido explorado y desarrollado puede ser clasificado como Recurso Mineral Medido si la naturaleza, calidad, cantidad y distribución de la información son tales que, a juicio de la persona competente que evalúa el Recurso Mineral, no queda duda razonable que el tonelaje y ley de la mineralización pueden ser estimados con márgenes estrechos y cualquier variación de lo estimado no afectaría de manera significativa la viabilidad económica potencial. Esta categoría necesita un elevado grado de confianza en la geología y los controles de yacimiento. La certeza en la estimación es suficiente como para facilitar la aplicación de parámetros técnicos y económicos, lo que hace posible una evaluación de la viabilidad económica, la cual presenta un mayor grado de certeza que una evaluación fundamentada en un Recurso Mineral Indicado. El grado de confianza geológica

y el nivel de certeza del Recurso Mineral Medido es similar al requerido para la evaluación de Reserva Mineral Probado. (Vilca Y. C., 2018)

Si se eliminan las incertidumbres en los factores que alteran un Recurso Mineral Medido puede considerarse como Reserva Mineral Probado. El Coeficiente de Certeza de este mineral es del 100%.

2.2.6. Recurso Mineral Indicado

Es aquel Recurso Mineral cuyo tonelaje, ley, densidad, forma, tamaño y otras propiedades geológicas pueden ser estimados con un nivel de confianza razonable. Su estimación se fundamenta en datos de exploración, toma de muestras y análisis obtenidos mediante métodos apropiados en lugares tales como afloramientos, trincheras, tajos, labores y sondajes. Los lugares de la toma de información (muestreo, mediciones y otros) están distribuidos de tal manera que no permiten confirmar una continuidad geológica y de ley, pero este intervalo es suficiente para suponer dicha continuidad. El nivel de confianza es lo suficientemente elevado como para asumir la continuidad.

Parte de un Recurso Mineral puede ser clasificado como un Recurso Mineral Indicado cuando la naturaleza, calidad, cantidad y disposición de los datos son suficientes para permitir una interpretación fiable del aspecto geológico y asumir la continuidad de la mineralización.

La confianza en la estimación es suficiente para permitir la aplicación de parámetros técnicos y económicos, así como una evaluación de viabilidad económica. El grado de confianza geológica y el nivel de certeza del Recurso Mineral Indicado es equivalente al requerido para determinar una Reserva Mineral Probable. Si se eliminan las incertidumbres en los factores que modifican un Recurso Mineral Indicado puede considerarse como Reserva Mineral Probable. El Coeficiente de Certeza de este mineral es entre 90% y 100%. (Vilca Y. C., 2018)

2.2.7. Recurso Mineral Inferido

Es aquel Recurso Mineral cuyo tonelaje y ley puede ser estimado con un bajo grado de confianza. Es estimado e inferido a partir de evidencias geológicas; la continuidad geológica y la ley es asumida pero no verificada. Se fundamenta en la información recolectada a través de técnicas adecuadas en afloramientos, trincheras, tajos, labores y sondajes que pueden ser

restrictivos o de calidad y fiabilidad inciertas. La categoría de Inferido busca informar situaciones en las que se ha identificado una concentración y ocurrencia de mineral, y se ha realizado pocas mediciones y muestreos, pero los datos son insuficientes para permitir una interpretación confiable de la continuidad geológica y/o de ley.

Es razonable suponer que la mayoría de los Recursos Minerales Inferidos pudieran considerarse Recursos Minerales Indicados con una exploración continua. No obstante, a causa de la incertidumbre del Recurso Mineral Inferido, no se asumirá que tal cambio siempre ocurrirá. La confianza en la estimación de Recursos Minerales Inferidos generalmente no es suficiente como que los resultados de la aplicación de los parámetros técnicos y económicos sean utilizados en una planificación precisa. Es por ello que no existe una relación directa entre un Recurso Inferido y alguna categoría de Reservas Minerales. (Vilca Y. C., 2018)

2.2.8. Factores que controlan la disponibilidad de los Recursos Minerales

Según Oyarzun R. (2011) afirma que:

Entre aquellos que no están familiarizados con la industria minera, es comúnmente aceptada la idea errónea de que la única condición necesaria para iniciar la operación de una mina es la existencia de un yacimiento mineral. Sin embargo, la realidad es mucho más complicada, ya que diversos factores como aspectos geológicos, ingenieriles, ambientales, económicos y políticos entran en juego en esta situación.

➤ Factores Geológicos

En el ámbito de la geología, existen dos términos en inglés que, aunque relacionados, tienen conceptos diferentes: "mineral deposit" y "ore deposit". Cualquier acumulación de minerales se considera un "mineral deposit", pero solo aquellas que pueden ser extraídas con un beneficio económico (o político-económico) se clasifican como "ore deposit". Para los propósitos de esta discusión, y reconociendo posibles limitaciones, utilizaremos el término "yacimiento mineral" para referirnos a la combinación de "mineral deposit" y "ore deposit". Como ya mencionamos, la viabilidad económica de un yacimiento puede cambiar con el tiempo. Los recursos minerales se pueden clasificar en las siguientes categorías:

Recursos esenciales: como suelos y aguas. También recursos energéticos como petróleo, gas natural, carbón, pizarras bituminosas, uranio y energía geotérmica.

Recursos metálicos: generalmente metales de transición como hierro, cobre, molibdeno, plomo, zinc.

Recursos de minerales industriales: Son productos tales como: metales preciosos, sales, amianto, arcillas, arenas, etc. Estos recursos comparten la característica de tener un valor "localizado", es decir, la ubicación para su explotación es determinada por procesos geológicos y no por decisiones humanas. Nuestra única decisión es si explotarlos o no. Por ejemplo, si hay un yacimiento de cobre en una provincia remota de Indonesia, tendríamos que ir allí si quisiéramos explotarlo. (Oyarzun, 2011)

➤ **Factores Ingenieriles y Económicos.**

Estos factores tienen un impacto en dos aspectos, a través de restricciones económicas.

Restricciones Técnicas: Estas surgen de la incapacidad tecnológica para llevar a cabo actividades mineras en ciertas circunstancias, como, por ejemplo, una operación a una profundidad de 10 kilómetros.

Restricciones Económicas: Estas derivan de los costos de la operación, por ejemplo, aunque sea posible construir el equipo necesario para la minería en Marte, los costos serían tan prohibitivos que, sin importar el recurso extraído, los gastos superarían los beneficios.

Además, los elementos económicos que influyen en la producción minera se centran en los principios de oferta y demanda. A su vez, los factores que afectarán esto incluirán los costos de ingeniería, los impuestos, los pagos por derechos de explotación minera, los salarios, entre otros. Los costos de la maquinaria minera son prácticamente uniformes en casi todos los países del mundo; por ejemplo, el precio de una excavadora apenas difiere, ya sea que la adquiramos en Sudáfrica o en Chile, lo mismo ocurre con los equipos de perforación. Lo que varía de un país a otro son las políticas fiscales (impuestos), las remuneraciones y la normativa ambiental. (Oyarzun, 2011)

➤ **Factores Políticos.**

Un elemento adicional vinculado a los mencionados es la "estabilidad política" de un país o región. La actividad de exploración de recursos minerales en un área de alto riesgo, como

por ejemplo la República Democrática del Congo, difiere significativamente de llevarla a cabo en Norteamérica o Europa. (Oyarzun, 2011)

➤ Factores Ambientales.

Los desafíos medioambientales asociados a la actividad minera se centran en tres áreas clave: la extracción del mineral en las minas, el procesamiento de los minerales y la gestión de los residuos. Durante el procesamiento de los minerales, es posible implementar sistemas de mitigación, como, por ejemplo, la reducción de las emisiones de dióxido de azufre en las instalaciones de fundición de cobre. (Oyarzun, 2011)

2.2.9. Reservas Minerales

Una Reserva Mineral se define como la porción de un Recurso Mineral Medido o Indicado que puede ser económicamente explotada. Esto abarca cualquier dilución de materiales y pérdidas que puedan ocurrir durante la extracción. Se han llevado a cabo evaluaciones exhaustivas, que pueden comprender estudios de viabilidad, y que consideran y ajustan factores como la extracción, la metalurgia, los aspectos económicos, las condiciones del mercado, las regulaciones legales, el impacto ambiental, las consideraciones sociales y gubernamentales. (Committee, 2012)

Oyarzun (2011) afirma que:

Para las empresas, las reservas pueden ser consideradas como un inventario de los recursos minerales que están siendo explotados con propósitos económicos. Sin embargo, la cantidad de este inventario se encuentra restringida por diversos factores, como los costos de explotación, los pagos de regalías e impuestos especiales, el precio del mineral extraído y la demanda del mercado.

La explotación de estas reservas se determina según las necesidades económicas de las empresas y, por supuesto, las condiciones del mercado, además de las limitaciones geológicas en términos de leyes minerales y cantidades disponibles.

Para que se considere un recurso como reserva, el nivel de certeza geológica debe ser muy alto y, aun así, pueden ser clasificadas en dos o tres categorías, dependiendo del enfoque adoptado por las empresas en cuanto al tema.

Las reservas minerales se dividen según su nivel de confianza, clasificándose en Reservas Probables Minerales y Reservas Probadas Minerales, en orden creciente de certeza. (Committee, 2012)

Una Reserva Probable se refiere a la porción del recurso mineral indicado que es económicamente viable para su explotación, y en algunos casos, del recurso mineral medido. La certeza en cuanto a la aplicación de los Factores Modificadores a una Reserva Probable es menor en comparación con una Reserva Probada. Aunque una Reserva Probable tiene un nivel de confianza más bajo que una Reserva Probada, aún cuenta con una calidad suficiente para servir como base para la toma de decisiones relacionadas con el desarrollo del yacimiento.

Es la parte del recurso mineral medido que es económicamente viable para su explotación. Esta categoría implica un alto grado de confianza en los factores que pueden modificar la situación. Representa el nivel más alto de confianza en la estimación de reservas, incluyendo una sólida confianza en la continuidad geológica y en las leyes del mineral, así como en la consideración de los factores que pueden modificar la situación. Sin embargo, en algunos yacimientos, el estilo de mineralización u otros factores pueden hacer que no sea posible alcanzar reservas probadas. (Committee, 2012)

La selección de la categoría adecuada de reserva de mineral se basa principalmente en el nivel de confianza correspondiente en el recurso mineral.

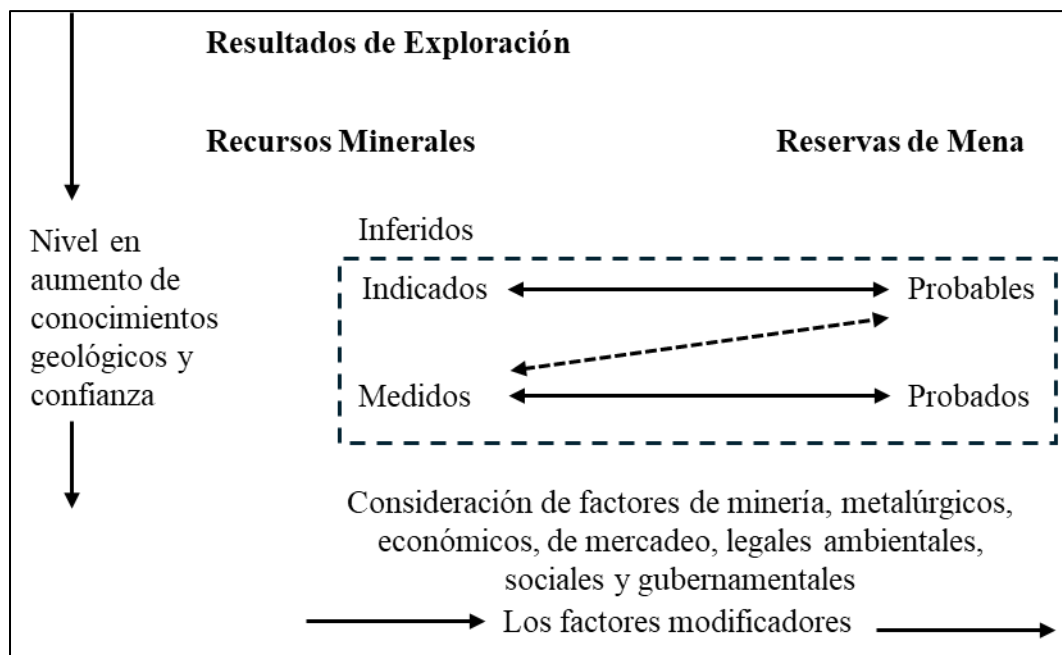


Figura 2: Esquema técnico sobre la categorización de los hallazgos mineros, donde la determinación de recursos minerales depende de un nivel en aumento de conocimientos geológicos y confianza. Los recursos minerales se organizan en una jerarquía de tres niveles según la solidez de la evidencia científica: los inferidos, que representan el grado más bajo de conocimiento; los indicados, con una base de datos más robusta; y finalmente los medidos, que ofrecen la mayor certidumbre técnica

Fuente: Código JORC (2012)

2.2.10. Factores que afectan a las Reservas Mineras

El principal factor son las variaciones en los precios de los metales. Por ejemplo, en un contexto de precios bajos, el volumen de reservas se reduciría, ya que solo se extraería el material que excede la ley de corte. La paradoja es que esto ocurre sin que el depósito experimente ningún cambio. El volumen de mineral permanece constante, la diferencia radica en su valor económico. Por otro lado, si se anticipa un escenario internacional con precios más favorables, no solo las reservas probadas aumentarían su producción, sino que también se justificaría la explotación en las áreas de reservas probables.

Los tributos adicionales también pueden tener un impacto en la rentabilidad de una reserva minera en funcionamiento, ya que aumentan los costos de producción de los metales. Una carga tributaria creciente puede requerir una ley de corte más alta, lo que reduce la rentabilidad. Además, esto puede dificultar el inicio de nuevos proyectos mineros, ya que podrían volverse económicamente inviables.

Por último, la tecnología también desempeña un papel importante en la operación de una

reserva minera. Los avances más recientes en técnicas de exploración han posibilitado el descubrimiento de depósitos que podrían no haber sido detectados utilizando métodos tradicionales. Asimismo, los progresos en los métodos de producción y procesamiento han conducido a una reducción constante en los costos y tiempos, permitiendo que las empresas operen volúmenes más grandes de reservas mineras de manera más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. (Ruiz, 2010)

2.2.11. Determinación de Reservas

Según Oyarzun (2011) En el ámbito minero, se deben calcular tres valores fundamentales para evaluar un yacimiento o, de manera más general, al examinar una propiedad minera. Estos tres valores son el tonelaje T de mineral presente en el yacimiento, el tonelaje de metal o sustancia mineral Q , y la concentración o ley del yacimiento X . Estos parámetros están relacionados por la fórmula $Q = T * X$. Una interpretación de esta expresión es que el valor Q es el resultado de la multiplicación de una cantidad geométrica T , llamada variable de posición, y de una concentración promedio X , conocida como variable de extensión.

La estimación del tonelaje T se refiere al problema geométrico.

En geoestadística, X es identificada como la variable regionalizada, la cual se describe como una función del espacio que varía de un punto a otro con cierta continuidad, y en general no se puede representar esta variación mediante una ley matemática extrapolable. Los datos que permiten conocer o estimar los parámetros mencionados se obtienen mediante observaciones directas (a través de mediciones, análisis químicos, pruebas de laboratorio) y observaciones indirectas, como interpretaciones, cálculos y suposiciones razonables.

Entre las suposiciones necesarias, la principal es que los componentes fundamentales de un depósito mineral y aquellos que han sido identificados u observados en un lugar específico (como una superficie expuesta, un pozo o una operación subterránea) se extienden o cambian hacia las áreas circundantes según la interpretación de los datos de exploración. También se asume que las observaciones se llevan a cabo de acuerdo con la naturaleza particular de un depósito dado, que las muestras se recolectan con la misma precisión y que representan fielmente una parte seleccionada del cuerpo mineralizado. Otra suposición es que las actividades de explotación han sido apropiadas y, por lo tanto, se conoce el grado de continuidad de la mineralización, lo que reduce el problema de cálculo a determinar el volumen de los bloques mediante métodos matemáticos.

Por último, en el proceso de cálculo, se supone que la forma complicada del depósito mineralizado puede ser representada de manera precisa utilizando un cuerpo hipotético equivalente que sea más fácil de calcular.

En el campo de la geoestadística, comprender la variable regionalizada implica entender dos conceptos geométricos:

- **Un Campo Geométrico**, que es un dominio donde la variable puede tener valores definidos y dentro del cual se analiza su variación.
- **Un Soporte Geométrico**, que es un volumen al que se refiere el valor de la variable regionalizada o donde se calcula.

2.2.12. Propósitos del Cálculo de Reservas

El objetivo de los cálculos de las reservas de un depósito mineral es establecer la cantidad, calidad y viabilidad económica de explotar comercialmente un mineral o materia prima.

La estimación de las reservas es un proceso que se lleva a cabo en todas las etapas del ciclo de vida de una propiedad minera, desde su descubrimiento inicial hasta las etapas avanzadas de la operación minera. Constituye uno de los aspectos fundamentales en la evaluación y no puede ser reemplazado. Lograr eficiencia en la extracción y aumentar la productividad de una mina es imposible sin un conocimiento detallado y exacto de las reservas disponibles.

Las estimaciones de reservas se llevan a cabo con el fin de establecer la duración de la fase de explotación y la cantidad de desarrollo necesario. También se utilizan para analizar la distribución de los valores minerales, calcular la producción anual, estimar la vida útil probable y potencial de la mina, planificar el método de extracción y el diseño de la planta, así como para mejorar los procesos de extracción, tratamiento y procesamiento.

Además, son útiles para determinar los requerimientos de capital, mano de obra, energía y materiales.

Estas evaluaciones son imprescindibles para calcular los costos de producción y evaluar la eficacia de las operaciones mineras, así como para planificar el desarrollo y evaluar las pérdidas asociadas con la actividad minera. Además, se utilizan para establecer estándares de control de calidad, facilitar actividades de financiamiento y servir como base para transacciones comerciales, adquisiciones y fusiones de empresas mineras. También son fundamentales para determinar los costos unitarios de venta y son necesarias para fines contables, que incluyen el agotamiento, la depreciación y, ocasionalmente, cuestiones fiscales. (Herrera & Jorge, 2019)

2.2.13. Código JORC

El Código JORC, abreviatura de Código de Australia para el Reporte de Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas de Mena, establece pautas y estándares mínimos para la divulgación pública de resultados relacionados con la exploración, recursos minerales y reservas de minerales en la región de Australasia. El Comité Conjunto de Reservas de Mena, conocido como JORC, se formó en 1971 y emitió varios informes con recomendaciones sobre la clasificación y la divulgación pública de reservas de minerales antes de la publicación de la primera edición del Código JORC en 1989.

Se aplica a todos los minerales sólidos, que incluyen carbón, diamantes y otras gemas, para los cuales las bolsas de valores solicitan información pública sobre los resultados de la exploración, los recursos minerales y las reservas mineras.

El Código JORC requiere que los informes públicos, basados en el trabajo realizado por una persona competente, destaquen las calificaciones y el tipo de experiencia necesaria para ser considerado competente. Además, proporciona amplias directrices sobre los criterios a considerar al elaborar informes sobre los resultados de la exploración, los recursos y las reservas de minerales. (Código JORC, 2001)

2.2.14. Aplicaciones de Código

Los destinatarios y los elaboradores de informes conforme a este código deben considerar las regulaciones adecuadas para la divulgación pública y garantizar que la información proporcionada cumpla con los requisitos exigidos por los inversionistas y sus asesores profesionales. Esto es fundamental para realizar una evaluación equilibrada y fundamentada sobre la mineralización comunicada.

Aunque se realicen esfuerzos dentro del código para abordar la mayoría de las situaciones que podrían surgir en la exploración de recursos y reservas de minerales, es probable que surjan dudas en ocasiones sobre el procedimiento adecuado a seguir. El código se aplica a todos los minerales sólidos, incluyendo carbón, diamantes y otras gemas, para los cuales las bolsas de valores de Australia y Nueva Zelanda requieren información pública sobre los resultados de la exploración de recursos y reservas mineras. El comité conjunto reconoce la necesidad de revisar periódicamente el Código para mantenerlo actualizado y relevante. (Código JORC, 2001)

2.2.15. Depósitos Orogénicos

Los depósitos de oro de origen orogénico representan una categoría de depósitos mineralógicos coherentes que se formaron a partir de fluidos con alto contenido de CO₂ y baja salinidad, a profundidades en el rango de 3 a 20 kilómetros dentro de la corteza terrestre. Tradicionalmente se ha creído que estos depósitos se generaron a partir de fluidos metamórficos de la corteza durante la transición entre las facies de anfibolita y esquistos verde. Sin embargo, investigaciones recientes realizadas en China sugieren que la fuente principal de fluidos proviene de las regiones subcorticales, y que la desvolatilización de losas de subducción y cuñas de sedimentos superpuestos juega un papel crucial en este proceso. Este reconocimiento de un origen relacionado con la subducción ofrece un marco dinámico coherente que sitúa la formación de estos depósitos de oro en el contexto de la evolución de un margen convergente. Los primeros depósitos se formaron a partir de fluidos hidrotermales magnéticos vinculados con la subducción durante fases de compresión moderada, dando lugar a una variedad de depósitos, incluyendo pórfidos de Cu-Au relacionados, depósitos epitermales de alta sulfuración, depósitos de Ag-Au y yacimientos de skarn tanto en entornos volcánicos como continentales. (Groves, 2019)

2.2.16. Batolito de Pataz

El Batolito de Pataz, que alberga las vetas auríferas, forma parte de un extenso cinturón de intrusiones que se extiende entre los 6° y los 11°30' de latitud a lo largo de la Cordillera Oriental. Este cinturón está compuesto principalmente por intrusiones de magmatismo calcoalcalino que se originaron en las rocas infra-silúricas fracturadas, con orientaciones predominantes en dirección noroeste-sureste. En la región de Pataz, se observan pequeñas extensiones de tonalitas y dioritas en los bordes del batolito, representando los primeros eventos de actividad magmática. La componente principal del batolito es la granodiorita, con variaciones que van desde monzogranito hasta tonalita. Las fases granodioríticas y monzograníticas muestran la presencia de numerosos enclaves de microdiorita en la base, así como diques y stocks de naturaleza félsica, peraluminosos y escasos lamprofiros, indicativos de una actividad hipabisal limitada. Estos diques cortan a través de los granitoides. El magmatismo peraluminoso se encuentra presente en la parte superior del batolito, manifestándose en forma de diques aplitíticos o stocks de granitos ricos en feldespatos potásicos con cuarzo pegmatítico. (Laubacher, G., Mégard, F., 1985)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Modelamiento Geológico: Un modelo geológico es una representación abstracta de la incierta realidad de una o más unidades geológicas que comprenden aspectos como la litología, la alteración, la mineralogía, las estructuras y otros fenómenos geológicos presentes en la formación rocosa. Este modelo se considera una fase inicial e imprescindible en el proceso de estimación de recursos minerales, ya que marca el punto de transición entre la geología y la ingeniería. (Hernandez, 2022)

Estimación De Recursos: La estimación de recursos implica la cuantificación de ciertos materiales naturales presentes en un tipo específico de depósito. Por ejemplo, los recursos y reservas de oro se pueden expresar en unidades de onzas, mientras que otros metales pueden calcularse en toneladas métricas. (Espinoza, 2018)

Recursos Minerales: Se refiere a la presencia de recursos naturales de valor económico, tanto dentro como fuera de la superficie terrestre, en una forma y cantidad que indiquen la posibilidad realista de una futura extracción rentable. (Guzman, 2012)

El Kriging Efficiency (KE): Es un parámetro geoestadístico que evalúa la eficacia del proceso de estimación mediante kriging, comparando la varianza de estimación con la varianza del valor verdadero o real. Se expresa como un valor adimensional, generalmente representado en forma de porcentaje, y refleja cuán bien el modelo captura la variabilidad espacial del depósito mineral (Rossi & Deutsch, 2014).

El Slope of Regression (SoR): La Pendiente de Regresión (SoR) mide la relación entre los valores estimados por kriging y los reales, donde un valor de 1 representa un modelo ideal sin sesgo y valores menores a 0.7 indican baja confiabilidad. Este parámetro es fundamental para evaluar la fidelidad del modelo geoestadístico y definir con precisión los límites en la clasificación de recursos minerales. (Rossi & Deutsch, 2014)

Muestreo: El muestreo es el proceso de seleccionar una porción representativa de un material mineralizado con el fin de determinar su contenido en elementos valiosos, leyes y características físicas. Su correcta ejecución es fundamental para la estimación confiable de recursos y reservas (Peters, 2011)

Tonelaje o Volumen: El tonelaje es la cantidad total de material (mineral o estéril) contenido en un yacimiento o parte de él. Se calcula a partir del volumen del cuerpo mineral multiplicado por su densidad promedio, y es fundamental para la evaluación de recursos y reservas. (Peters, 2011)

Estructura Mineralizada: Una estructura mineralizada es cuerpo mineral tabular o alargado, que se forma cuando minerales precipitan a partir de soluciones hidrotermales dentro de fracturas, fallas o zonas de debilidad de la roca. Estas estructuras pueden contener concentraciones económicas de metales como oro, plata, cobre, entre otros. (Evans, 2009)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

3.1.1. Ubicación Política

La zona de estudio se localiza en el centro poblado de Retamas, situado en el distrito de Parcoy, provincia de Pataz, dentro del departamento de La Libertad. (Ver Anexo 01, Plano de Ubicación)

En este sector, las estructuras mineralizadas denominadas vetas Victoria y Mercedes se ubican dentro de la Concesión Minera Acumulación Parcoy N° 1, cuya titularidad y operación corresponden a la Empresa Minera Consorcio Minero Horizonte.

3.1.2. Ubicación Geográfica

Las vetas Victoria y Mercedes se localizan en el norte del Perú, dentro de la vertiente del Pacífico y emplazadas en el Batolito de Pataz. El área de estudio abarca una extensión aproximada de 100 hectáreas situándose en el margen izquierdo del Río Parcoy. La zona presenta una morfología de montaña con una altitud promedio de 2950 m.s.n.m.

De acuerdo con el Datum WGS84, zona 18-S, los vértices que delimitan el área de interés en la zona de Puyhuan de la Concesión Minera Acumulación Parcoy N° 1 son:

Tabla 1. Coordenadas UTM Sistema WGS84.

PTO.	COORD WGS84	
	ESTE	NORTE
1	227452	9113012
2	228430	9113012
3	228430	9111990
4	227452	9111990

3.1.3. Accesibilidad

El acceso al área de investigación se realiza por vía aérea hasta el aeródromo de Pías desde Trujillo, luego a través de la carretera Nacional hasta llegar al distrito de Parcoy, en el centro poblado Retamas. La distancia y el tiempo se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Accesibilidad para la investigación

Tramo	Vía	Distancia (Km)	Tiempo (min)
Trujillo - Pías	Aérea	351	35
Pías - Retamas	Trocha	22	50

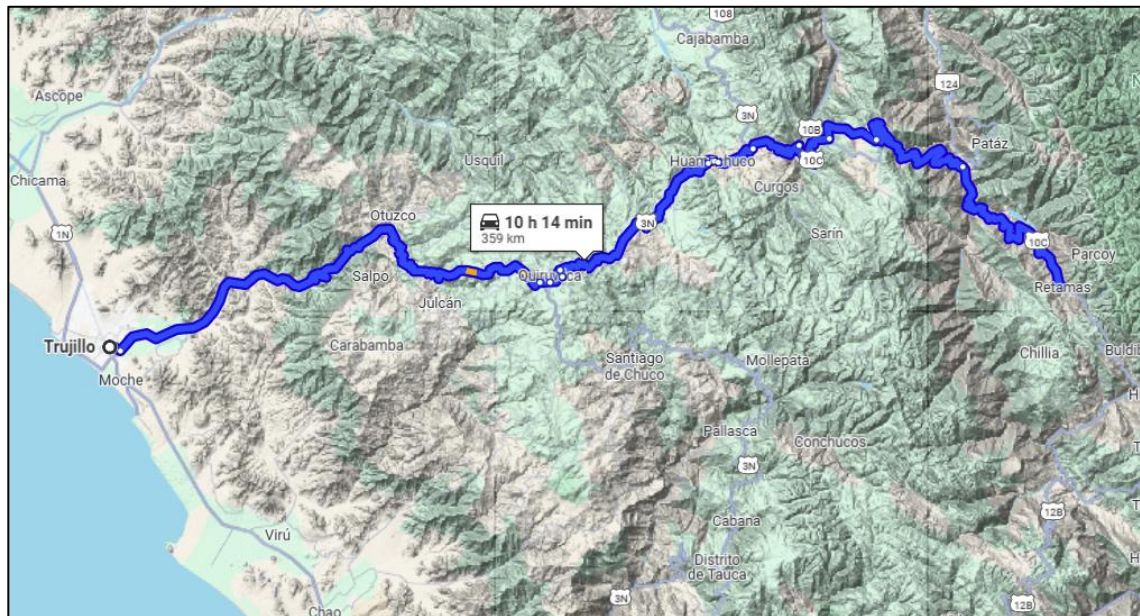


Figura 3. Acceso terrestre desde Trujillo para llegar a la zona de Puyhuan perteneciente a la Concesión Minera Acumulación Parcoy N°1.

Fuente: Google Maps (2025)

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Etapa de Gabinete

La elaboración de esta tesis se basó en la recopilación, selección y evaluación de información bibliográfica, publicaciones de organismos gubernamentales y relacionadas con trabajos previos, así como documentos vinculados a depósitos similares en términos de litología, alteraciones, estructuras geológicas, estimación de recursos, entre otros aspectos. Además, se consideró la información disponible dentro de la empresa sobre las actividades cotidianas, lo que facilitó la elaboración de un plan de trabajo adecuado.

3.2.2. Etapa de Campo

Durante esta fase, se llevó a cabo el trabajo de exploración dentro de la mina, específicamente en las vetas Victoria y Mercedes en los niveles 2870 y 3300 msnm. Se realizaron levantamientos topográficos detallados para identificar y cartografiar la orientación y el ángulo de inclinación de la veta, así como los contactos geológicos y mineralógicos. Se llevaron a cabo muestreos sistemáticos con un total de 102 muestras tomadas con el fin de recopilar datos necesarios para una precisa estimación de los recursos minerales. Además, se completó un mapeo geológico detallado de las estructuras mineralizadas, la litología y las alteraciones hidrotermales a una escala de 1/250. Se realizaron muestreos sistemáticos en el interior de la mina en todas las áreas de trabajo, siguiendo los protocolos y estándares establecidos, para la estimación precisa de los recursos minerales. Además, se utilizó información previamente recopilada durante campañas anteriores para complementar los datos obtenidos.

3.2.3. Etapa de Análisis e Interpretación

En esta fase final, se realiza el procesamiento y análisis de los datos obtenidos en el terreno, iniciando con la validación de los resultados capturados. Luego, se procede a la elaboración de planos temáticos como; geológicos, estructurales, los cuales incluyen información detallada como la composición litológica, la presencia de minerales, las alteraciones observadas, los puntos de muestreo y los datos geoquímicos obtenidos con valores de Au en Gr/Tn. Asimismo, se han generado secciones longitudinales y transversales de las vetas

Victoria y Mercedes en puntos estratégicos para mejorar la comprensión de su comportamiento mineral. Con base en todos estos datos recopilados, se redacta el informe final.

3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación

La presente investigación se clasifica como descriptiva, explicativa, correlacional y transversal, debido a la naturaleza de los objetivos planteados y a la forma en que se obtienen y analizan los datos.

Es descriptiva porque se centra en caracterizar las propiedades geológicas de la estructura mineralizada y de la roca encajonante, tales como litología, estructuras y distribución espacial de la mineralización. Estas características son fundamentales para la construcción del modelo litológico y permiten representar de manera objetiva el yacimiento a partir de datos observados en campo.

Asimismo, la investigación es explicativa, ya que busca interpretar los eventos geológicos que controlan la distribución del mineral, como la influencia de estructuras, contactos litológicos y condiciones geológicas en la concentración y continuidad de la mineralización. Esto permite entender los factores que explican la variabilidad de leyes y geometría del cuerpo mineralizado, lo cual es importante para el cálculo de recursos.

El estudio es también correlacional, debido a que se analiza las relaciones existentes entre variables geológicas y geoquímicas, tales como el espesor de la veta, la litología de la roca caja, las leyes del mineral y su distribución espacial. Estas correlaciones son esenciales para el modelamiento geológico y la estimación de recursos, ya que permiten establecer patrones y tendencias dentro del yacimiento.

Desde el punto de vista temporal, la investigación es transversal, porque la recolección de datos se realiza en un único periodo de tiempo, sin realizar seguimiento de la evolución de las variables a lo largo del tiempo. Los datos obtenidos representan el estado actual del yacimiento y son suficientes para cumplir con los objetivos del modelamiento y cálculo de recursos minerales.

En cuanto al diseño, la investigación es no experimental, ya que no se manipulan las variables de estudio. Los datos geológicos son registrados tal como se presentan en el campo, respetando las condiciones reales del yacimiento.

Finalmente, se emplea un método directo de toma de datos mediante el muestreo de la estructura mineralizada, lo cual garantiza información confiable y representativa. Este método es apropiado para estudios de modelamiento litológico y estimación de recursos, ya que proporciona datos reales que sirven de base para la interpretación geológica, el modelamiento tridimensional y el posterior cálculo de recursos minerales.

3.3.2. Población de Estudio

Niveles desde 2870 hasta 3300 m.s.n.m., con una extensión de 100 Ha en la zona de Puyhuan.

3.3.3. Muestra

Vetas: Victoria, Victoria Techo y Mercedes.

3.3.4. Unidad de Análisis

Tonelaje (Tm), Ley (Gr/Tn)

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas por utilizar son:

Levantamientos topográficos de las labores subterráneas.

Recolección de datos litológicos, mineralógicos, estructurales, de alteración, mediante mapeos geológicos en todas las labores

Muestreo de canal en las estructuras.

Análisis e interpretación, modelamiento geológico y cálculo de recursos mediante uso de software Leapfrog Geo.

3.5. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El análisis e interpretación de los datos obtenidos en campo mediante el mapeo geológico de las labores mineras subterráneas a diferente nivel, será procesado en gabinete, mediante la digitalización de la información obtenida en el AutoCad 2021, y posteriormente el resultado de muestreo y la interpretación de cada una de las estructuras nos ayudarán a generar el modelamiento y estimación de recursos mediante el software Leapfrog Geo.

3.6. GEOLOGÍA LOCAL

➤ Depósitos Cuaternarios

Existen depósitos coluviales sobre el Batolito de Pataz, acompañado de suelos recientes. Se observan acumulaciones de sedimentos fluviales que muestran una deficiente selección granulométrica sin estratificación definida, formando depósitos cuaternarios recientes generalmente de naturaleza ígnea (terrenos de cultivo actuales), al sur del área de estudio, grandes áreas del Batolito están cubiertas por depósitos coluviales hasta el río Llacuabamba. Estos depósitos fluviales y coluviales predominan en la región en forma de lechos, terrazas expuestas en las quebradas Huinchus, Vizcachas, Pomachay y Gigante.

Sus grosores son variables al igual que su extensión, igualmente su composición litoclastica y su fragmentometria, dependieron mucho de las rocas que han servido de fuente y de la distancia a aquella. (Cabanillas, 2008)

➤ Rocas Intrusivas

- ***Batolito De Pataz***

El Batolito Carbonífero - Mississippiano de Pataz es parte de una gigante intrusión de composición calco alcalina, el cual se extiende a lo largo de la Cordillera Nororiental (Laubacher y Megard 1985). Tiene una forma lenticular alargada se debe a su emplazamiento a lo largo de una fractura regional de dirección andina NW-SE alineada a lo largo del flanco Oriental del Marañón, este batolito aflora a lo largo de 160 Km. con anchos que varían de 2

a 8 Km. Y largo aproximado de 70 Km., entre Vijus y Buldibuyo, se observa 2 Km. De ancho en Retamas Parcoy.

Asimismo, este batolito se encuentra seccionado por grandes fallas de rumbo N70°W con tendencia al E-W que genera en su mayoría desplazamientos sinistresales y en menor proporción desplazamientos dextrales, dando la apariencia de apretamientos y aperturas del macizo hasta alcanzar 8 Km. como sucede en la zona de cerro el Gigante y zona de Potacas. Se determina que la gran falla o fractura que dio origen a las pulsaciones magmáticas fue de tipo normal formado durante el periodo de distensión de la fase final de la tectónica Eohercínica, esto generó grandes fallas de carácter regional los cuales habrían servido de conducto para el emplazamiento del batolito, esta falla tendría una orientación N-S hacia N-NW siendo rellenada por material de naturaleza calco alcalina como la granodiorita, la cual es la roca predominante en este batolito y al mismo tiempo es gran huésped de mineralización (Cabanillas, 2008)

El interés económico se plasma en estructuras tipo vetas, rellenas de cuarzo, piritas auríferas, y sulfuros de metales bases como la galena y la esfalerita en menor grado. Estas vetas obedecen a un sistema complejo de formación estructural siendo el “lazo cimoide multiple” a escala distrital la que predomina en el yacimiento y las formas geométricas “tipo rosario” a una escala menor, producto de la intensidad en el cizallamiento de las vetas y sus posteriores emplazamientos de mineral. (Cabanillas, 2008)

Litológicamente está compuesto por granodiorita de grano grueso, cuarzo monzonita, granito, tonalita, diorita; las rocas presentan texturas granulares (de grano medio) a microgranulares (de grano fino) hasta porfiríticas (mayormente hipabisales). El porcentaje areal a nivel de todo el batolito es granodiorita y cuarzo monzonita 55%, tonalita 22%, diorita 13%, granito 9%.

Los depósitos asociados al magmatismo calco alcalino (granodioritas, tonalitas, dioritas, etc.) son depósitos endógenos que ocurren relacionados a procesos pegmatíticos, neumatóliticos e hidrotermales dando lugar a la forma de estructuras filoneas de Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, Au, W, Mo, Be, estos depósitos ocurren principalmente relacionados a Arcos Magmáticos, en los Arcos Insulares o Márgenes Continentales. Los Arcos Magmáticos están constituidos principalmente por magma calco alcalino y puede subdividirse en 2 series.

Tipo I (ígneo) el cual se origina por fusión parcial del manto.

Tipo S (sedimentario) la cual se origina por fusión parcial de la Corteza Continental (anatexia)

En ambos casos se desarrolla la diferenciación magmática con tendencia a la formación de rocas graníticas. (Cabanillas, 2008)

Este intrusivo se presenta muy fracturado, sus zonas de debilitamiento y fracturamiento en un comienzo han servido de canales de transporte de las soluciones mineralizantes, que dieron lugar a la formación de las vetas. El Batolito de Pataz está limitado por dos grandes fallas, una al lado NE que lo pone en contacto con el complejo Marañón y la otra al borde SW que lo separa del paquete sedimentario del Mesozoico, ambas fallas son de alto ángulo y probablemente están asociadas a fallas de gravedad que originó la fosa tectónica del Marañón y han podido servir de canales de transporte de las soluciones de la mineralización. El batolito de Pataz según dataciones radiométricas las rocas del Batolito de Pataz están entre 305 y 332 MA. (Schercieber, 1990), ubicándose dentro del Carbonífero Inferior. Las rocas intrusivas del Batolito de Pataz también han sido datadas por métodos de ^{40}Ar - ^{39}Ar en biotitas (Haberlin ET.al 2002, Economic Geology Vol. 99-Nº4), los que localizan la edad de 329.2 ± 1.4 y 328.1 ± 1.2 MA para el monzogranito y la granodiorita, respectivamente del Plutón de Pataz. La aplita fue datada con 322.1 ± 2.8 MA en moscovita y 325.4 ± 1.4 MA en biotitas, y representan un pulso magmático un poco más joven del Batolito de Pataz. También se ha datado la intrusión granodiorítica de Parcoy en 329 1MA. por el método U/Pb en zircones.

La aproximación más cercana de la edad de la mineralización es ~314 MA obtenido por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita, una síntesis en torno a la alteración de las zonas mineralizadas (Haberlin ET.al 2002). La máxima edad de la mineralización fue de 322 ± 2.8 MA dada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en una aplita moscovita. Ambos datos sugieren que la mineralización de oro fue posterior al emplazamiento del Batolito de Pataz 329 MA y de los viejos eventos regionales de deformación. (Cabanillas, 2008)

El Batolito de Patáz es considerado el más grande de la región norte del Perú, se le considera de edad Paleozoica de acuerdo al análisis de K\Ar el cual reportó 321 millones de años (Miranda C.,1997) correspondiendo al Mississippiano superior del Carbonífero inferior; se le ha podido reconocer desde el Noreste de Patáz hasta el sureste de Tayabamba es decir unos 150 Km. y tiene una forma lenticular al sur como al norte, esta geometría es observada en superficie estando limitada por la vegetación y la inaccesibilidad de algunos afloramientos, aún falta por reconocer lo que está cubierto por el Complejo Marañón.

El interés económico se plasma en estructuras tipo vetas, rellenas de cuarzo, piritas auríferas, y sulfuros de metales bases como la galena y la esfalerita en menor grado. Estas vetas obedecen a un sistema complejo de formación estructural siendo el “lazo cimoide multiple”

a escala distrital la que predomina en el yacimiento y las formas geométricas “tipo rosario” a una escala menor, producto de la intensidad en el cizallamiento de las vetas y sus posteriores emplazamientos de mineral.

Las vetas son típicamente Orogénicas constituidas por relleno de fractura donde prima la asociación “cuarzo-pirita-oro” así como otros minerales asociados en menor magnitud como clorita, sericita, calcita, $\pm$ ankerita, $\pm$ galena, y $\pm$ esfalerita.

Las estructuras en la zona de Puyhuan se alinean en una dirección dominante 290° con buzamientos al NE con ángulo de 45° aprox. (Cabanillas, 2008)

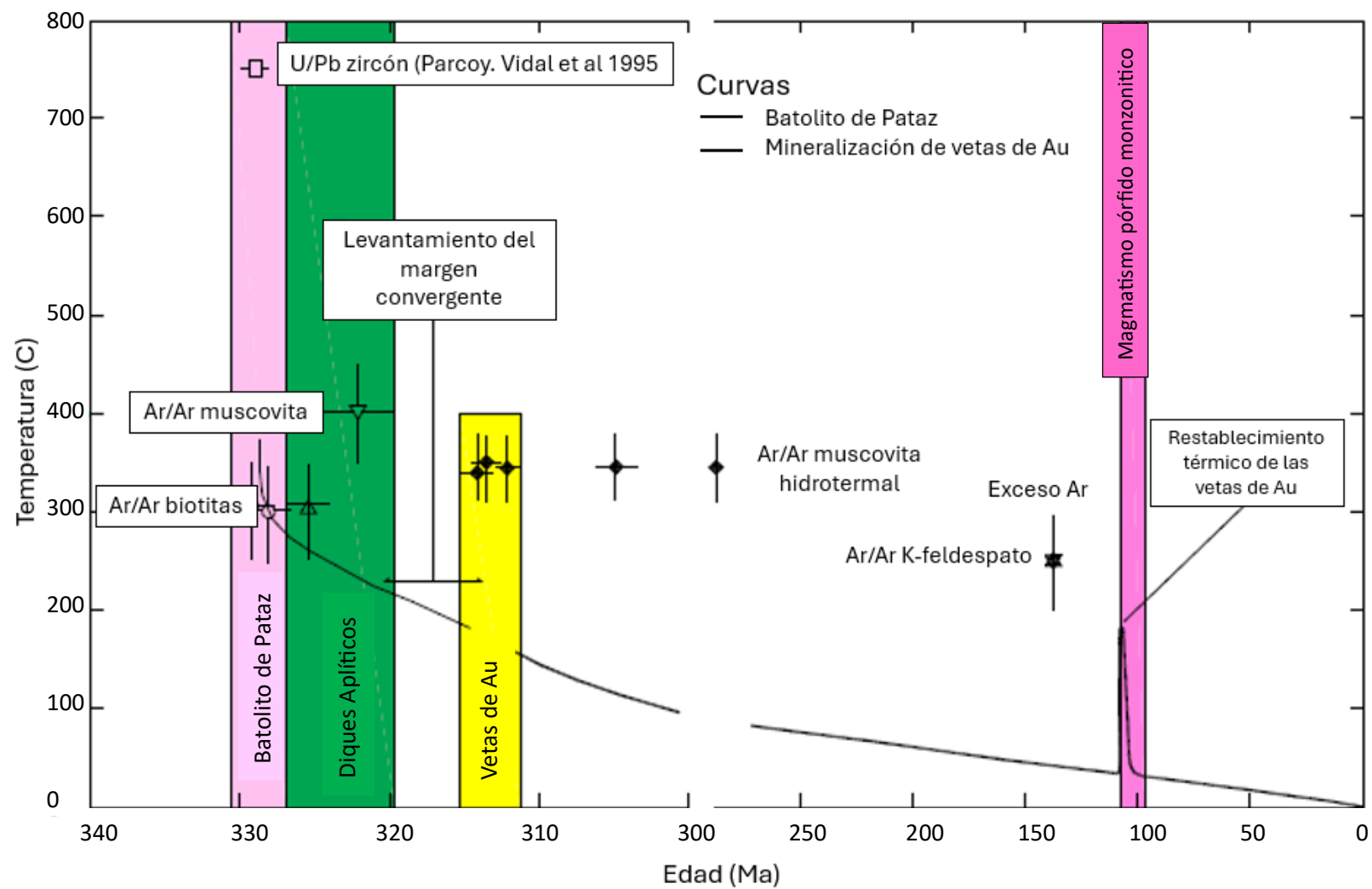


Figura 4. Edades aproximadas de mineralización y batolito de Pataz, realizadas por Haberlin Et al. 2002

COLUMNA ESTRATIGRAFIA								
ERA	SISTEMA	SERIE	PISO	UNIDAD LITO ESTRATIG.	ESP. m.	LITOLOGIA	DESCRIPCION DE LAS FACIES	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATER.		HOLOCENO	FLUVIAL COLUVAL ALUVAL			CLASTOS (BLOQUES, CANTOS, ARENAS, LIMOS, ARCILLAS), CANCHALES, DERRUBIOS, ALUVIONES	
			PLEISTOCENO	ELUVIOGLACIALES	100 m.		MORRENAS, CONGLOMERADOS	
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	SANTO NIANO	FORMACION CHOTA	200 m.		LUTITAS INTERCALADAS CON ARENISCAS LIMONITAS EN PAQUETES GRESOS COLOR ROJO	
		INFERIOR	ALVIANO MEDIO	FORMACION CRISNEJAS	200 m.		CALISAS MACISAS INTERCALADAS CON MARGAS DE COLOR GRIS	
			NEOCO NIANO	FORMACION GOLLARISQUIZGA	50-150 m.		ARENISCAS Y CONGLOMERADOS DE COLOR BLANCO	
	JURASICO	LIAS TKSUPERIOR	SINENURIA NORIANO	GRUPO PUCARA	300 m.		CALIZAS DOLOMITAS INTERCALADAS DOLOMITAS Y CALIZAS DE COLOR GRIS CLARO A GRIS NEGRO SKARN LA ESTRELLA	
	PERMICO	SUPERIOR		GRUPO MITU	300 m.		ARENISCAS CONGLOMERADAS INTERCALADAS CON LUTITAS LIMONITAS Y ARENISCAS CON MATRIZ ARENOSA TOBACEA EN SU BASE	
PALEOZOICO	CARBONIFERO	INFERIOR						
		SUPERIOR		VOLCANICOS LAVASEN	100 m.		PIROCLASTOS, RIOLITAS, RIODACITAS, COLADAS DE LAVAS ACIDAS Y ANDESITAS	
PRE-CAMBRIANO				ROCAS METAMORFICAS DEL COMPLEJO MARAÑON				
				FILITAS			FILITAS, PIZARRAS	
				METAVOLCANIC.			META - ANDESITAS RIODACITAS RIOLITAS	
				MICA ESQUISTOS	2000 m.		MARGAS-MICAESQUISTOS (SERICITA-ESQUISTOS) INTERCALADOS POR TOBAS CUARCITAS	

STOCKS PORFIRITICOS, MUCHOS DE ELLOS SON DE COMPOSICION GRANODIORITICA A MONZONITICA, ALGUNOS SON TONALITICOS

BATOLITO DE PATAZ, LITOLÓGICAMENTE ESTA COMPUESTO POR GRANODIORITA DE GRANO GRUESO, CUARZO MONZONITA, GRANITO, TONALITA, DIORITA; LAS ROCAS PRESENTAN TEXTURAS GRANULARES (DE GRANO MEDIO) A MICROGRANULARES (DE GRANO FINO) HASTA PORFIRITICAS (MAYORMENTE HIPABISALES).

Figura 5. Columna Litoestratigráfica de la Región de Pataz, se enmarca de azul la cronología de las estructuras mineralizadas de la zona de Puyhuan perteneciente a la Concesión Minera Acumulación Parcoy N°1.

Fuente: Cuadrángulo de Pataz, INGEMMET modificada por H. Alvarez – 2010

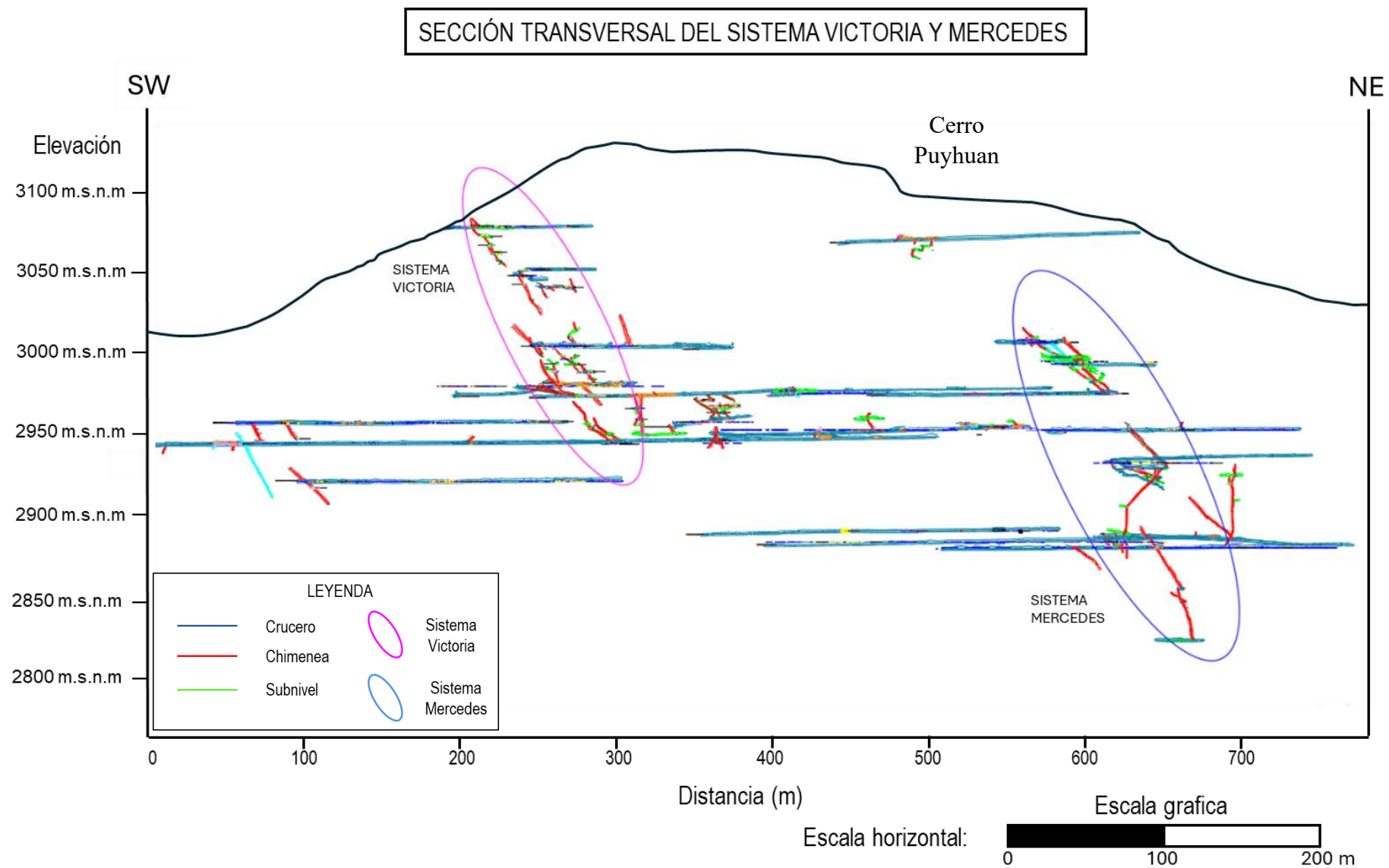


Figura 6. Vista transversal de las vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan

En este plano se puede observar el lineamiento de las vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan.

3.7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El distrito minero ha sido afectado por los diferentes eventos tectónicos sucedidos en los últimos 300 M.a. dando como resultado una complejidad estructural muy marcada. No presenta fuerte foliación, por lo que se supone intruyó la corteza superior en una zona extensional. Dicha zona extensional se habría reactivado subsecuentemente como consecuencia de un sistema de fallas inversas oblicuas durante la mineralización y de nuevo por fallamiento post mineralización. (Granda, 2018)

Las fallas producto de los eventos tectónicos Regionales, deben haber tenido un efecto en la distribución de zonas mineralizadas en el distrito de Parcoy, que incluyen fallamiento y plegamiento pre-mineral, sin-mineral y post-mineral. Los eventos pre-minerales incluyen deformación y metamorfismo en el Complejo Maraón Proterozoico (la orientación estructural o direcciones de compresión no son muy reconocidas), débil acortamiento NW-SE en el Ordoviciano, acortamiento NE-SW en el Devoniano tardío, y extensión NW-SE durante la intrusión del Batolito de Patáz en el Mississippiano (Haeberlin y Fontboté, 2002).

Como en todos los sistemas de vetas, los controles estructurales de las vetas y clavos en el distrito de Parcoy son varios y complejos. De primera importancia son las fallas de primer-orden (NW-SE) huéspedes del mineral y que, probablemente controlan la inclinación general hacia el Sur de los clavos mineralizados.

Fuerzas tectónicas originaron fallas de cizalla, con movimiento sinistral en la mayoría de los casos. Las vetas de cizalla presentan espejos de falla con estrías en varias direcciones y están por lo general limitados por capas pequeñas de panizo.

A lo largo del Batolito se conocen varias minas en operación y otras abandonadas, destacando de Sur a Norte: Bloque Huaylillas: La Estrella, Bloque Buldibuyo: Minas de Marsa, Alaska y El Gigante, Bloque Parcoy: Consorcio Minero Horizonte, Bloque Pías: Minas Culebrillas, Ariabamba, Bloque Patáz: Minas de Poderosa S.A., El Tingo, La Lima y Papagayo. Es importante destacar que los bloques Buldibuyo (Sur) y Pías, Patáz (Norte) contienen estructuras de muy bajo ángulo de buzamiento (20-40°E), mientras que en el bloque Parcoy (Central) las estructuras tienen altos ángulos de buzamiento (50-80°E) variación de Este a Oeste. Esta diferencia debida posiblemente a movimientos

diferenciados de los Bloques post mineralización, que por basculamiento pudieran estar presentando actualmente un buzamiento diferente al original previo al basculamiento. (Granda, 2018)

En la zona de estudio, el sistema de estructuras pre-mineral es complejo, siendo posible que muchas de las estructuras minerales se hayan formado por esfuerzos tectónicos y otros se hayan formado en condiciones de contracción por enfriamiento. Las fallas pre-mineralización son las que controlan la distribución de las vetas. En la etapa estructural post-mineral la continuidad es muy marcada, las fallas con rumbos promedios a E-W y alto ángulo, son muy fuertes y de variados desplazamientos alcanzando decenas a centenas de metros. Se observan fallas longitudinales subparalelas en rumbo y buzamiento a las vetas mineralizadas, al parecer son fallas de reactivación que han servido para enriquecer las vetas.

El Batolito de Pataz en la localidad de la mina de Parcoy, está controlado por una falla longitudinal con una dirección aproximada de N30W, donde se ha emplazado el intrusivo, esta falla es de tipo dextral, los afloramientos del intrusivo son de diferentes dimensiones en espesor. Los cuales son mostrados por que las fallas longitudinales han sido cortadas por fallas transversales que tienen una dirección de N45E aproximado que son aparentemente posteriores y forman bloques levantados y hundidos.

Las fallas longitudinales mencionadas anteriormente forman fallas secundarias tensionales que son los lineamientos de la estructura mineralizada conformados en los sistemas de las vetas Victoria y Mercedes.

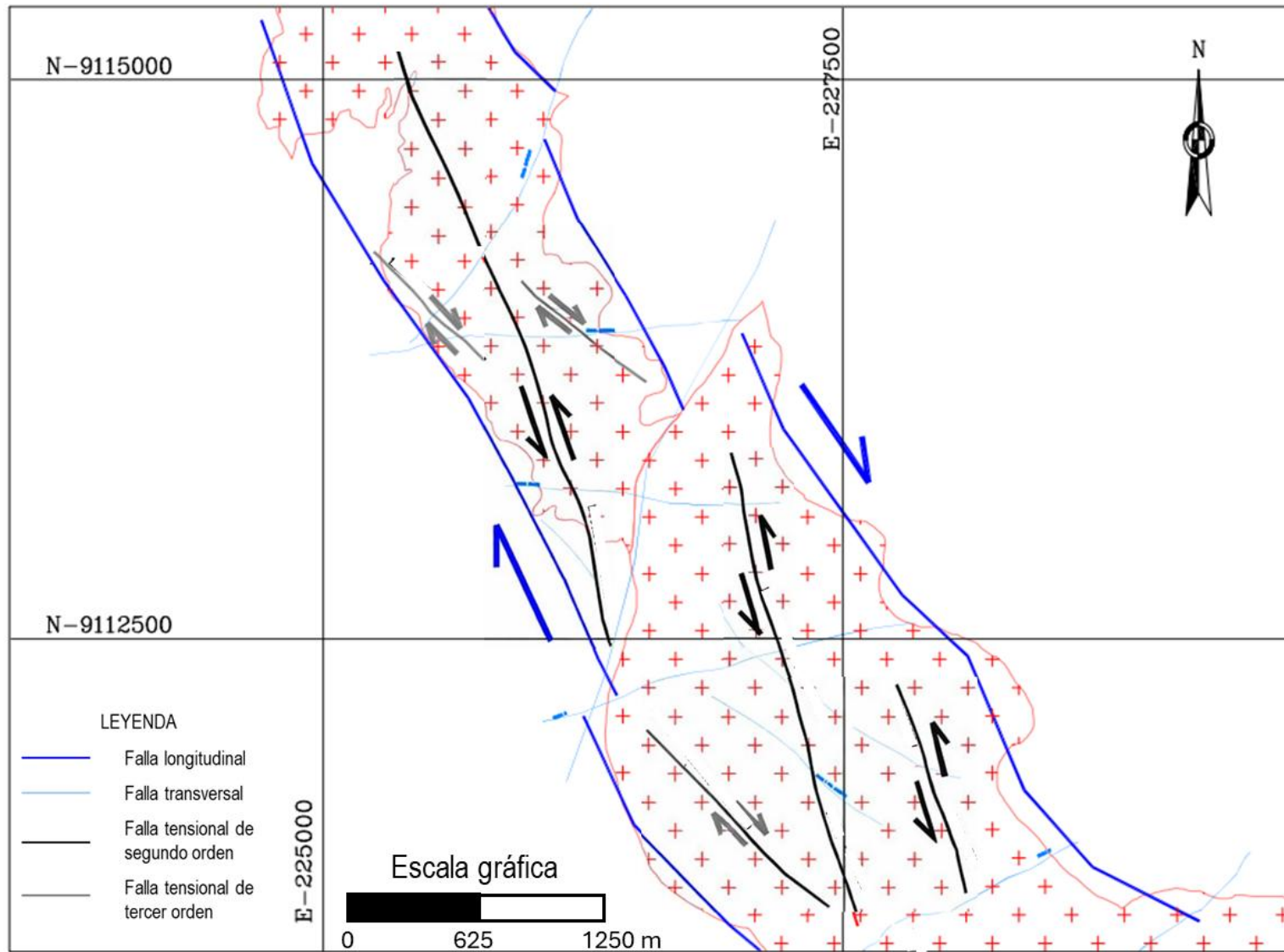


Figura 7. Comportamiento estructural del yacimiento orogénico en CMH.

➤ Fallas

En la zona de estudio, uno de los problemas en la exploración, es el aspecto estructural, por la complejidad de la zona. Por lo cual se han clasificado en:

- *Fallas Longitudinales NW - SE*

Las fallas de rumbo subparalelas, generalmente paralelas a las vetas mineralizadas, constituyen uno de los principales elementos estructurales reconocidos en el área de estudio. Estas estructuras corresponden predominantemente a fallas de carácter postmineral, cuyo desarrollo ha tenido una influencia directa sobre la geometría, continuidad y comportamiento geomecánico de los cuerpos mineralizados. Su presencia se manifiesta a través de ensanchamientos locales de las vetas, asociados principalmente a zonas de cabalgamiento, así como acuñamientos progresivos y discontinuidades estructurales que afectan la continuidad lateral y vertical de la mineralización.

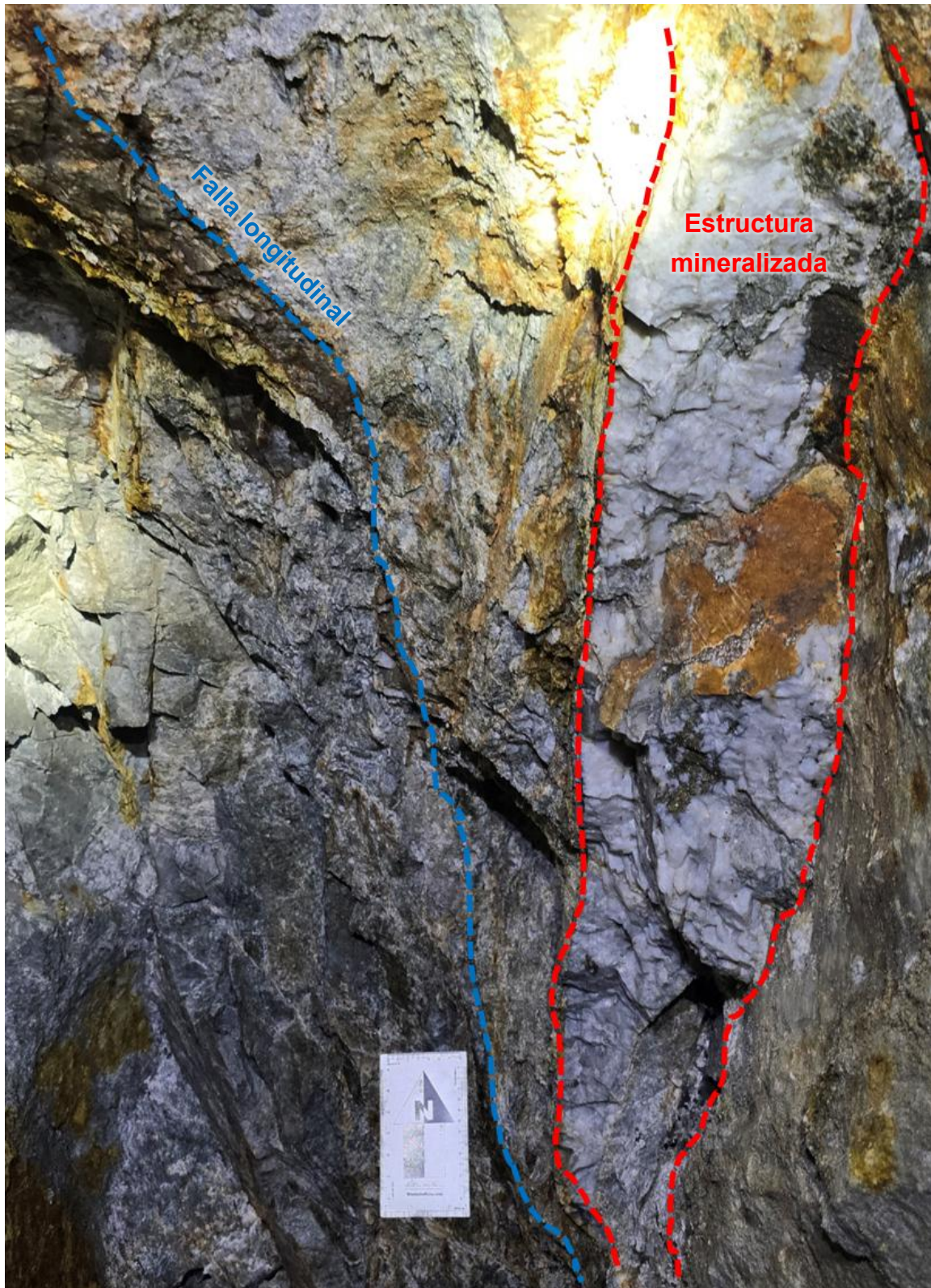
Desde el punto de vista cinemático, estas fallas presentan una variedad de mecanismos de movimiento, predominando fallas normales con componente sinistral, así como fallas inversas con componente dextral. Los rechazos observados son altamente variables, con desplazamientos que oscilan desde algunos centímetros hasta varios metros, lo que sugiere la ocurrencia de múltiples episodios de reactivación tectónica. Estas reactivaciones han contribuido a la compleja arquitectura estructural del yacimiento, dificultando en algunos sectores la correlación estratigráfica y estructural entre niveles de explotación.

En conjunto, estas fallas y fracturas conforman un sistema estructural ampliamente desarrollado, que ejerce un control significativo sobre la distribución espacial y orientación de las vetas. El buzamiento de este sistema presenta una variación sistemática en función de la cota, con inclinaciones suaves del orden de 10° hacia el noreste en los sectores más profundos de la mina, incrementándose progresivamente hasta alcanzar valores superiores a 60° NE en los niveles superiores. Esta variación en el ángulo de buzamiento sugiere una respuesta estructural compleja, posiblemente asociada a cambios en el régimen de esfuerzos durante las diferentes etapas de deformación tectónica que afectaron al área.

La reactivación de estas fallas con posterioridad al evento de mineralización ha dado lugar al desarrollo de fallamientos paralelos en el techo de las vetas, generando zonas de

debilidad estructural en la caja techo. Como consecuencia, estas zonas presentan una elevada susceptibilidad a procesos de desmoronamiento y colapso, lo que condiciona la estabilidad de las labores mineras. Este comportamiento geomecánico representa un factor crítico en el diseño y ejecución de las labores de explotación, haciendo necesaria la implementación de medidas de sostenimiento adecuadas y un control geotécnico riguroso.

Finalmente, la comprensión detallada de este sistema de fallas resulta fundamental para la interpretación estructural del yacimiento, así como para la planificación minera y la evaluación de riesgos geomecánicos, dado su impacto directo tanto en la continuidad de la mineralización como en la estabilidad de las excavaciones subterráneas.



Fotografía 1. Acuñaamiento de estructura mineralizada por falla longitudinal subparalela a la veta Victoria.

- ***Fallas Diagonales NNW – SSE A N - S***

Las fallas con rumbo promedio N–S a NNW–SSE y buzamiento alto hacia el oeste constituyen un conjunto estructural relevante dentro del área de estudio. Estas fallas se presentan con frecuencia agrupadas en bloques, dando lugar a sistemas de fallamiento gravitacional que afectan de manera significativa la arquitectura estructural del macizo rocoso. En otros sectores, dichas estructuras se manifiestan de forma aislada, aunque manteniendo una clara expresión estructural y cinemática.

Las vetas mineralizadas se encuentran generalmente afectadas por este tipo de fallamiento, evidenciando desplazamientos de diversa magnitud y sentido. Desde el punto de vista cinemático, estas fallas presentan comportamientos variados, incluyendo movimientos normales, inversos, sinistres y dextrales, lo que refleja un régimen de esfuerzos complejo y posiblemente la superposición de distintos eventos deformacionales. Como resultado, las vetas pueden experimentar desplazamientos, truncamientos locales, cambios en el espesor y variaciones en la continuidad tanto lateral como vertical.

En aquellos casos en los que estas fallas presentan buzamientos bajos, se desarrollan estructuras de tipo sobre-escurrimiento local, las cuales generan zonas de superposición y apilamiento de bloques rocosos. Estas estructuras pueden producir engrosamientos aparentes de las vetas o la repetición parcial de los cuerpos mineralizados, lo que complica la interpretación estructural y la correlación entre niveles.

La presencia de este sistema de fallas ya sea en forma de bloques gravitacionales o como estructuras aisladas, ejerce un control importante sobre la estabilidad del macizo rocoso y sobre la geometría final de las vetas. Por ello, su identificación y caracterización detallada resultan fundamentales para la interpretación estructural del yacimiento, la planificación minera y la evaluación de los riesgos geomecánicos asociados a las labores subterráneas.



Fotografía 2. Desplazamiento de 40 cm de la Veta Mercedes (rojo) afectada por una falla inversa de alto ángulo.

- ***Fallas Transversales E - W***

Las fallas con rumbo promedio E–W y buzamiento alto hacia el norte o sur constituyen un sistema estructural mayor que afecta de manera significativa al intrusivo, correspondiente al Batolito de Pataz. Estas estructuras dividen al cuerpo intrusivo en bloques estructurales bien definidos, generando basculamientos diferenciales que condicionan la geometría del macizo rocoso. Este comportamiento se manifiesta claramente en la variación del buzamiento de las vetas mineralizadas entre los distintos bloques estructurales, evidenciando un control directo de este sistema de fallas sobre la disposición espacial de las vetas.

Desde el punto de vista cronológico, muchas de estas fallas se consideran preminerales con respecto al sistema principal de vetas de rumbo NW–SE, actuando como estructuras heredadas que influyeron en la localización y orientación inicial de la mineralización. No obstante, se reconoce que varias de estas fallas experimentaron reactivaciones posteriores al evento mineralizante, lo que produjo reajustes estructurales que afectaron la continuidad y geometría de las vetas ya formadas.

La reactivación postmineral de estas fallas se expresa mediante desplazamientos variables de las vetas, cambios locales en el buzamiento y la generación de zonas de debilidad estructural, lo cual tiene implicancias tanto en la interpretación geológica como en la estabilidad geomecánica de las labores mineras. En consecuencia, este sistema de fallas E–W desempeña un rol fundamental en la evolución estructural del yacimiento y en el control de la mineralización, siendo indispensable su análisis detallado para una correcta interpretación del modelo geológico y estructural del área de estudio.

3.8. CONTROL LITOLÓGICO DE LAS VETAS VICTORIA Y MERCEDES

La granodiorita constituye la litología que presenta las condiciones fisicoquímicas más favorables para la interacción con los fluidos mineralizantes y la posterior deposición de mineralización aurífera en trampas estructurales. Sus características mineralógicas, textura y grado de fracturamiento facilitan la circulación de fluidos hidrotermales, así como los procesos de reacción fluido–roca, favoreciendo la precipitación de minerales de

mena y ganga dentro de las estructuras favorables, principalmente vetas y zonas de cizalla.

En este contexto, la granodiorita actúa como una roca hospedante eficiente, permitiendo el desarrollo de vetas con espesores significativos y una mayor continuidad lateral y vertical. La compatibilidad geoquímica entre esta litología y los fluidos mineralizantes favorece cambios en las condiciones fisicoquímicas, tales como variaciones de pH, fugacidad de azufre y estado redox, que controlan la precipitación del oro y minerales asociados.

Por el contrario, se reconocen sectores con composiciones más básicas, correspondientes a cuerpos de microdiorita, los cuales no presentan condiciones favorables para el emplazamiento de vetas de gran potencia. En estas litologías, las vetas rara vez superan espesores de 1 metro y se caracterizan por contenidos auríferos relativamente bajos, con valores que oscilan entre 7 y 25 g Au/t. Esta limitada capacidad de hospedaje puede estar relacionada con una menor reactividad química frente a los fluidos hidrotermales, así como con un comportamiento mecánico diferente que restringe el desarrollo de espacios abiertos adecuados para la deposición mineral.

En consecuencia, la variabilidad litológica dentro del intrusivo ejerce un control significativo sobre la distribución, potencia y ley de las vetas mineralizadas. El reconocimiento de estas diferencias resulta fundamental para la interpretación del modelo metalogenético del yacimiento y para la optimización de las estrategias de exploración y explotación minera.



Fotografía 3. Roca granodiorita como control litológico de la zona de Puyhuan.

3.9. CONTROL ESTRUCTURAL DE LAS VETAS VICTORIA Y MERCEDES

El sistema estructural descrito constituye el control predominante y ejerce la mayor influencia en el emplazamiento de la mineralización dentro del yacimiento. Este control está determinado por un conjunto de fallas cuyo origen se asocia inicialmente a un régimen compresivo, con desarrollo de fallas inversas que condicionaron la arquitectura estructural primaria del macizo rocoso. Estas estructuras generaron zonas de apertura preferencial en los sectores donde las fallas presentan menores ángulos de buzamiento, favoreciendo la formación de espacios abiertos que posteriormente actuaron como trampas estructurales para la circulación y deposición de los fluidos mineralizantes.

Durante una etapa posterior de relajación del régimen de esfuerzos, se desarrolló un sistema de aperturas tensionales que produjo la dislocación parcial del sistema estructural principal. Este proceso dio lugar a la generación de ramificaciones secundarias de las vetas, conocidas como splits o ramales, las cuales se disponen de manera subparalela o divergente respecto a la estructura principal. Estas ramificaciones incrementan la complejidad geométrica del sistema de vetas y contribuyen a la dispersión lateral de la mineralización.

Las reactivaciones longitudinales posteriores de las fallas principales provocaron una redistribución de los esfuerzos a lo largo de las estructuras mineralizadas, generando una geometría característica de tipo “rosario”, definida por alternancias de ensanchamientos y estrangulamientos a lo largo del rumbo de las vetas. Esta geometría resulta de la combinación entre desplazamientos diferenciales y reaperturas localizadas de las estructuras preexistentes.

Finalmente, la interacción entre las vetas principales y los ramales asociados da lugar a una configuración estructural compleja, comúnmente descrita como un “huso estructural”, el cual representa una zona altamente favorable para la concentración de mineralización. Este tipo de geometría constituye un elemento clave en el control del espesor, continuidad y ley de las vetas, siendo de particular importancia para la interpretación estructural del yacimiento y para la definición de blancos de exploración y explotación minera.

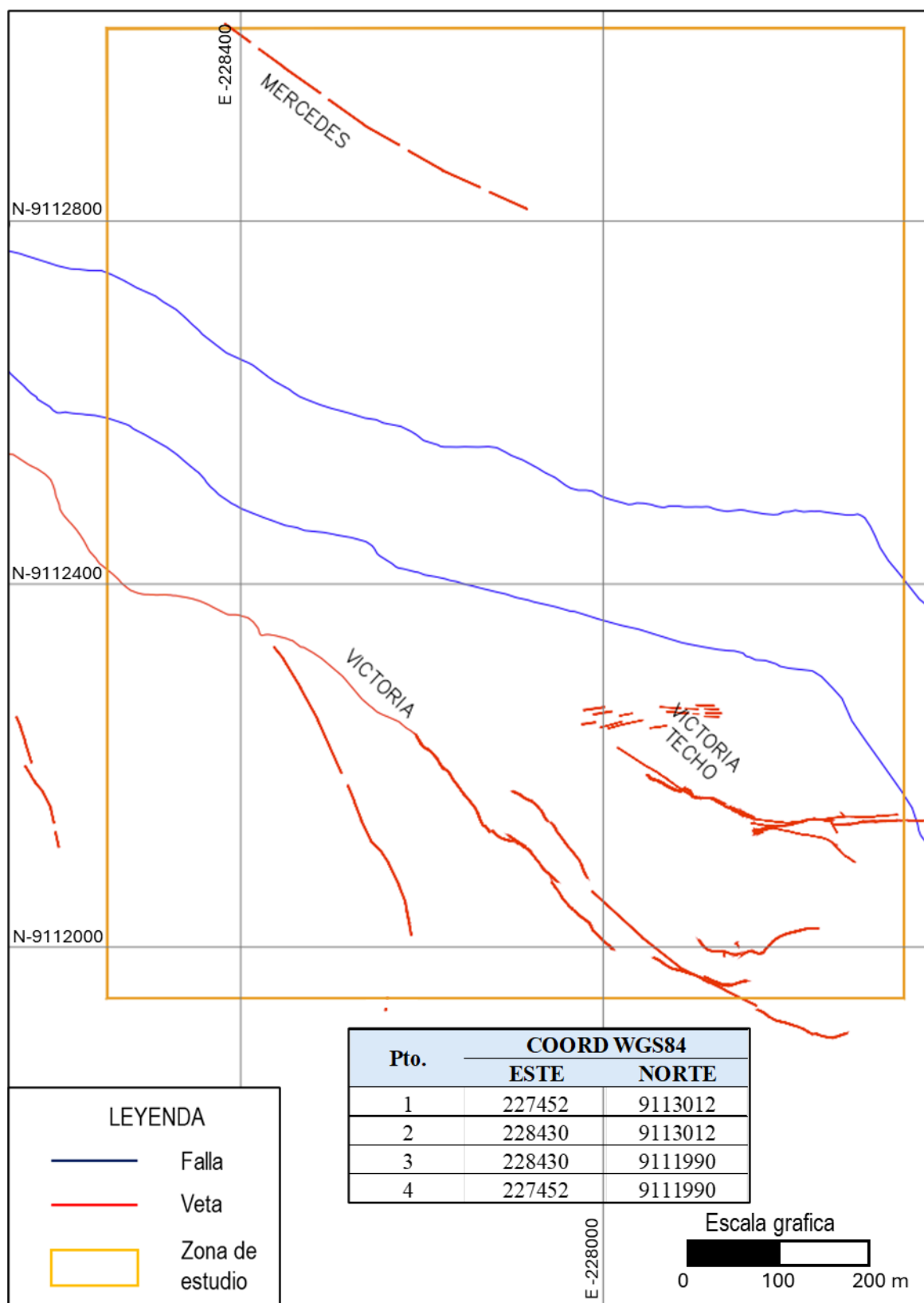


Figura 8. Sistema Estructural de las Vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan.

3.10. CONTROL MINERALÓGICO

La mineralización económica del yacimiento se encuentra principalmente controlada por la presencia de cuarzo de color blanco a gris y pirita de textura fina y deleznable. Este ensamble mineral actúa como indicativo de las zonas con mayor potencial aurífero, ya que la pirita, en su presentación delicada y friable, se encuentra íntimamente asociada al cuarzo portador de oro y otros elementos trazas. La distribución de estos minerales refleja de manera directa la influencia de las estructuras controlantes, tales como fallas y fracturas, que actuaron como canales de circulación de los fluidos hidrotermales.

Adicionalmente, se observa que el ensamble principal es invadido por clorita acompañada de cuarzo gris, la cual rellena fracturas preexistentes generando texturas de brecha y de relleno de fractura. Estas texturas brechadas evidencian episodios de fracturamiento y reactivación de las estructuras, así como la interacción entre procesos tectónicos y mineralización. La clorita, en particular, indica alteración hidrotermal asociada a fluidos de baja a moderada temperatura y juega un papel importante en la preservación de los espacios abiertos necesarios para la deposición de minerales de mena.

La combinación de estas texturas —cuarzo con pirita fina, fracturas rellenas y brechamiento cloritizado— proporciona un registro detallado de los mecanismos de emplazamiento de la mineralización y de los episodios estructurales que controlan la distribución espacial de los cuerpos mineralizados. Este conocimiento resulta fundamental para la interpretación geológica y para la planificación de labores de exploración y explotación, permitiendo identificar zonas de mayor ley y continuidad dentro del yacimiento.



Fotografía 4. Control mineralógico de las vetas Victoria y Mercedes, emplazamiento de cuarzo y pirita.

3.11. CONTROLES DE MINERALES DE ALTERACIÓN

Debido a los procesos hidrotermales que han ocurrido, estos han afectado en diversos grados a la roca encajonante, en relación con el foco mineralizante, debido al fracturamiento de la roca que fue ocasionado por esfuerzos tectónicos, generando zonas de debilidad propicias para que se efectuara las diferentes alteraciones.

Evidentemente el fracturamiento en la roca encajonante facilitó la circulación de líquidos y gases.

➤ Sericitización

La sericitización se encuentra inmediatamente después de la zona mineralizada al techo de la veta, este tipo de alteración es bastante frecuente y se evidencia al tacto en forma untuosa en los dedos, como también a la lupa en forma de escamas, la intensidad de la alteración es pervasiva pues la roca pierde las características texturales, por las alteraciones de los componentes de la roca (feldespatos y plagioclasas).

El ensamble de minerales de este tipo de alteración es la sericita-cuarzo-caolinita, con disseminaciones de pirita cúbica, esto se debió a la destrucción total o parcial de los feldespatos y plagioclasas de la granodiorita.

La influencia de la alteración varía llegando en algunos casos a ser de centímetros pasando a metros en otros lugares, cuando ocurre el ensanchamiento de la alteración en la roca encajonante, esta se comporta de manera deleznable y cambiando a colores blanquecinos. (Vilca A. M., 2007)

➤ **Silicificación**

Este tipo de alteración se encuentra mejor expuesto al piso de la veta, la silicificación es producida por la introducción de sílice en las rocas, y esto genera el endurecimiento de estas haciéndolas impermeables, debido al fracturamiento y la permeabilidad de la roca encajonante, esta alteración puede ser de débil a fuerte.

En esta alteración también se puede encontrar pirita en forma cúbica disseminada y en algunos casos formando venillas de piritas, la influencia de la alteración es de algunos centímetros hasta varios metros. (Vilca A. M., 2007)

Se describen los ensambles mineralógicos de las alteraciones predominantes en orden de cercanía a la veta.

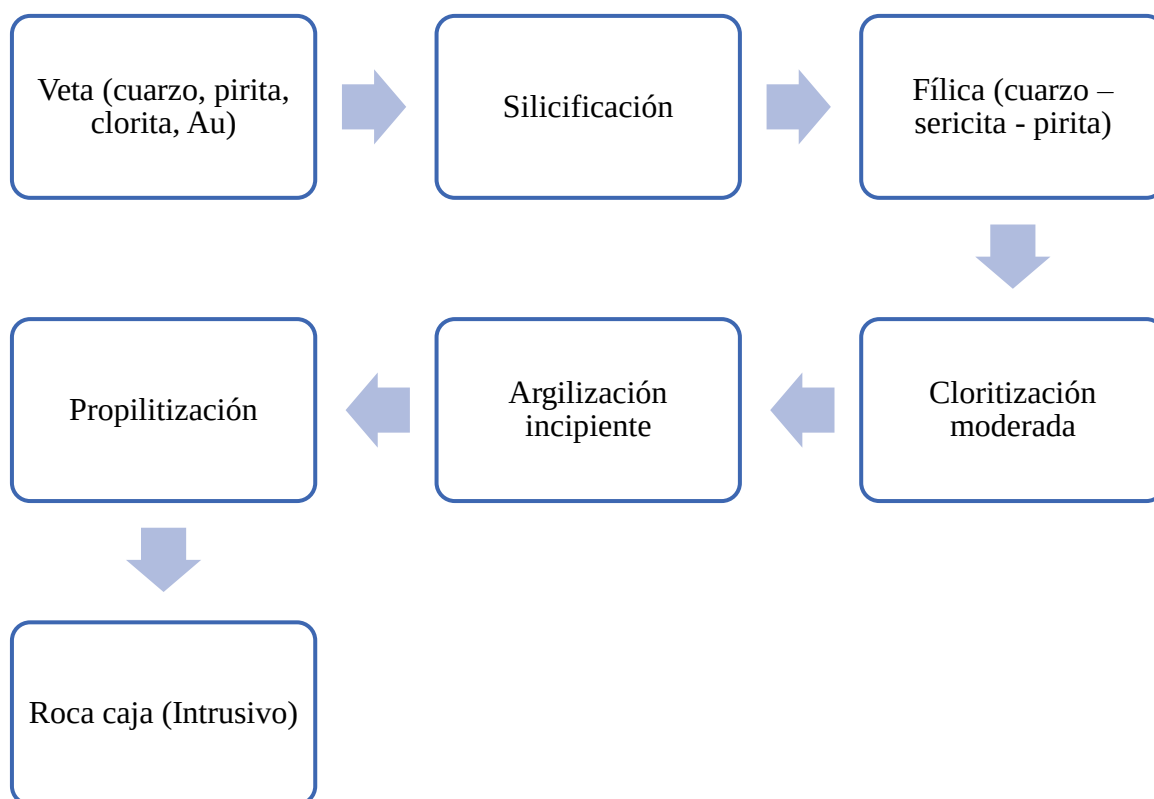


Figura 9. Control mineralógico y de alteración de las vetas Victoria y Mercedes

La silicificación se presenta en casi todo el halo de alteración siendo más predominante en medio de la veta como rocas silicificadas en forma de “caballos estructurales” y brechas hidrotermales con fragmentos angulosos (típico de fragmentos poco trabajados) de las cajas de la veta, los cuales nos indican gran liberación de energía y precipitación de los iones metálicos casi al mismo tiempo y por lo general se presentan en zonas donde suele cambiar los buzamientos. Por otro lado, se observa a la cloritización más cerca de la veta que la argilización siendo ésta de mayor temperatura y refleja dos o más eventos de pulsación los cuales han obliterado la secuencia paragenética de alteración.

La alteración en las rocas encajonantes varía poco debido a la escasa variación en la litología, en las granodioritas se aprecia una alteración sericítica con cloritización pervasiva y poca epidota, el ancho de estas alteraciones depende de la potencia de la veta, pero no son muy anchas promedia, ya en las zonas donde las vetas se ramifican la alteración es más discontinua y se forman como cuerpos de hasta 3 metros de alteración en promedio.

3.12. DESCRIPCIÓN DE VETA VICTORIA Y MERCEDES

Las vetas en este sector son principalmente de cuarzo-sulfuros caracterizándose por una variable textura y mineralogía que refleja distintas etapas de formación y concentraciones metalogénicas. El cuarzo es el mineral dominante, presentándose en diferentes formas: lechoso, grisáceo y translúcido, siendo el cuarzo lechoso el más abundante, seguido por el grisáceo y, en menor porcentaje, el translúcido. La distribución de estos tipos de cuarzo no es aleatoria, sino que está fuertemente ligada a la mineralización aurífera, ya que las zonas con cuarzo blanco grisáceo tienden a presentar mayores concentraciones de oro, mientras que las áreas con cuarzo lechoso suelen ser más pobres en mineralización.

En cuanto a los sulfuros, representan generalmente menos del 5% del volumen total de la veta, siendo la pirita el más abundante y rentablemente económico. La pirita se presenta en diversas formas y tamaños dentro de la misma veta: pirita gruesa cúbica, pirita media a fina y pirita fina. Estas variedades no se distribuyen de manera uniforme, sino que aparecen en parches y microvenillas dentro del cuarzo, lo que refleja heterogeneidad en los procesos de precipitación.

Otros sulfuros presentes incluyen galena, esfalerita y arsenopirita. La galena y la esfalerita suelen encontrarse en concentraciones bajas y de forma localizada, formando parches discretos en algunas secciones de la veta. Por su parte, la arsenopirita se presenta en menor cantidad, pero su ocurrencia puede actuar como indicador de zonas auríferas, funcionando como guía en la exploración.

El oro nativo o libre es frecuente en algunas áreas del yacimiento y suele asociarse a parches de cuarzo grisáceo y a sulfuros finos a medios. La relación entre el tamaño de grano de la pirita y la ley de oro es notable: la pirita fina a media se asocia con los contenidos de oro más altos, mientras que las piritas más grandes o gruesas generalmente presentan menor contenido aurífero. De manera similar, un incremento en la presencia de galena en los parches de sulfuros suele coincidir con clavos de muestreo que presentan mejores valores de oro.

Desde un punto de vista genético, este yacimiento es de tipo orogénico donde las vetas están dominadas por cuarzo con sulfuros en proporciones menores, mostrando zonación textural y mineralógica que refleja cambios en temperatura, presión y química de los fluidos mineralizantes durante su formación.

En síntesis, la mineralogía del yacimiento muestra una marcada heterogeneidad espacial, donde la interpretación de las asociaciones cuarzo-sulfuros-oro resulta crucial para la

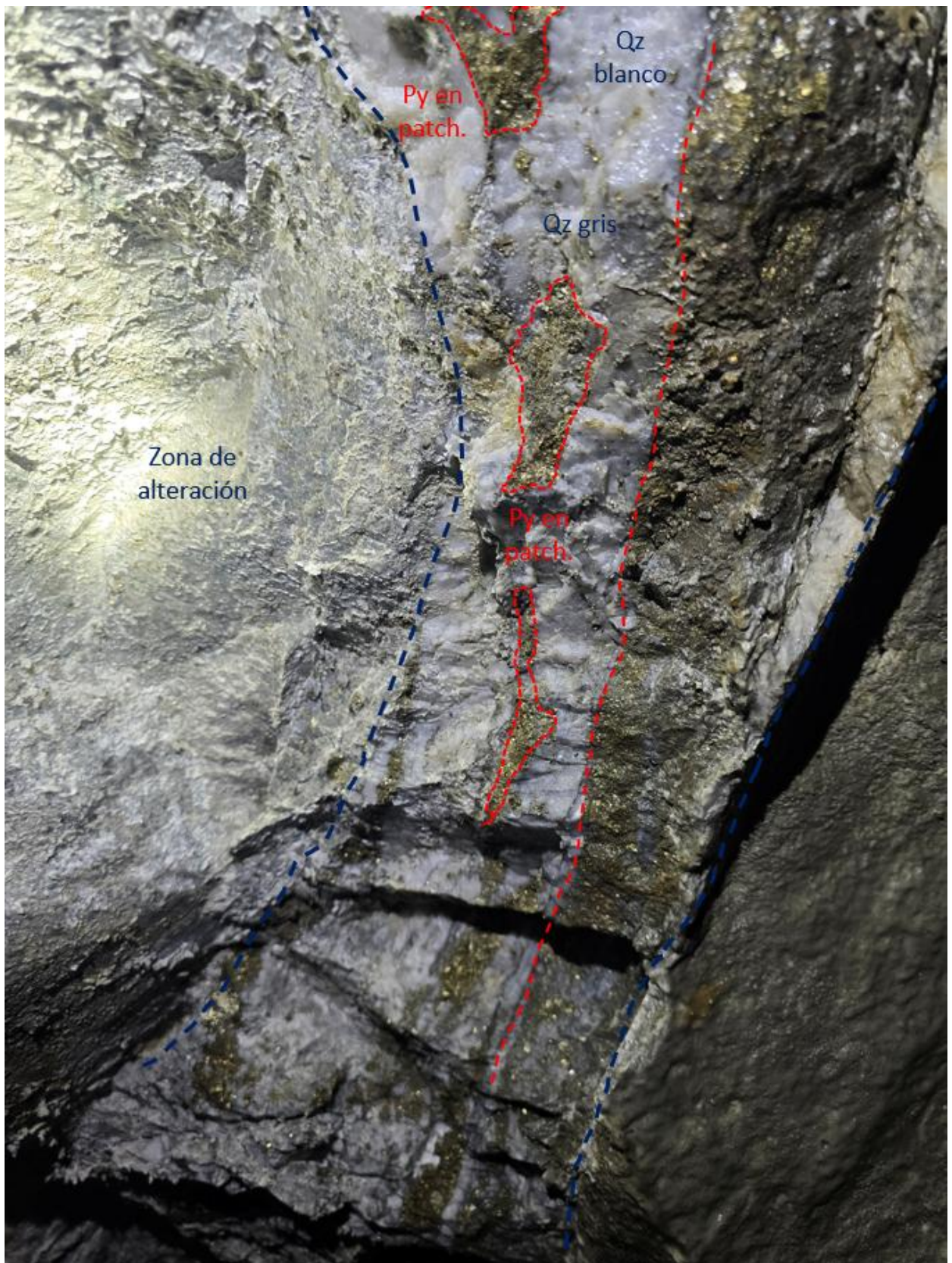
prospección y exploración. La identificación de parches ricos en pirita fina, galena y arsenopirita, así como la presencia de cuarzo grisáceo, constituye un indicador confiable de zonas auríferas, permitiendo enfocar los esfuerzos de muestreo y extracción en los sectores de mayor potencial económico.

➤ **Veta Victoria**

- ***Azimut Promedio:*** 300°
- ***Buzamiento Promedio:*** 54° NE.
- ***Límites O Controles De La Veta:*** La continuidad de la veta Victoria presenta variaciones significativas a lo largo de su rumbo. Hacia el sur, la veta tiende a acunarse progresivamente, evidenciando una disminución de su espesor y continuidad lateral, lo que sugiere un control estructural dominante por tensiones locales y la geometría de las fracturas en esa dirección. Por el contrario, hacia el noroeste, su desarrollo se encuentra condicionado por la presencia de la veta Encanto, la cual actúa como límite estructural y controla parcialmente la orientación y continuidad de la mineralización.

En la zona de intersección entre la veta Victoria y la veta Encanto se observan desplazamientos de carácter dextral, los cuales reflejan reactivaciones longitudinales y movimientos relativos de bloques a lo largo del sistema de fallas asociadas. Este desplazamiento no solo indica la presencia de un régimen de esfuerzos transcurrente local, sino que también ha influenciado en la geometría de la veta, generando ramificaciones y ensanchamientos localizados que afectan la continuidad y espesor de la mineralización.

El análisis de estas relaciones estructurales permite inferir los controles laterales de la veta Victoria, así como los efectos de las interacciones entre sistemas de vetas y fallas adyacentes. Este conocimiento es esencial para la interpretación del modelo tridimensional de la mineralización, la planificación de labores subterráneas y la identificación de zonas de alta ley y continuidad.



Fotografía 5. Veta de Cuarzo blanco – gris y parches de pirita.

- **Consideraciones Estructurales:** El sistema de vetas Victoria está constituido por dos ramales principales, denominados Victoria y Victoria Techo, que presentan una notable persistencia tanto en rumbo como en buzamiento, siendo los principales conductos de mineralización del sector. La continuidad de estos ramales sugiere que estuvieron controlados por condiciones estructurales favorables durante la actividad hidrotermal, lo que permitió la circulación prolongada de fluidos mineralizantes y la acumulación de sulfuros y oro en los espacios abiertos de la fracturación.

En el extremo noroeste (NW), cercano a la intersección con la veta Encanto, se identifican otros ramales de menor tamaño, los cuales son angostos, discontinuos y menos persistentes, localizados principalmente en el piso de la estructura y subordinados a la geometría de la veta Encanto. Estas ramificaciones reflejan la complejidad del sistema y la existencia de zonas con menor potencial mineralógico, pero que pueden actuar como corredores secundarios de mineralización.

Desde un punto de vista estructural, el buzamiento del sistema Victoria está condicionado por la falla San Francisco, la cual presenta un rumbo paralelo al de las vetas y un buzamiento de aproximadamente 70°SW. Esta falla funciona como un control tectónico significativo, determinando la orientación, continuidad y posibles desplazamientos de los ramales, que aún deben cuantificarse mediante estudios detallados. La interacción entre las vetas principales, los ramales secundarios y la falla San Francisco evidencia que la mineralización está estrechamente ligada a la actividad tectónica, donde las fracturas y discontinuidades definen los sectores de mayor concentración de oro y sulfuros.

El sistema Victoria, por su orientación discordante a la veta Encanto, aparentemente constituye una estructura tensional, formada entre dos estructuras principales.

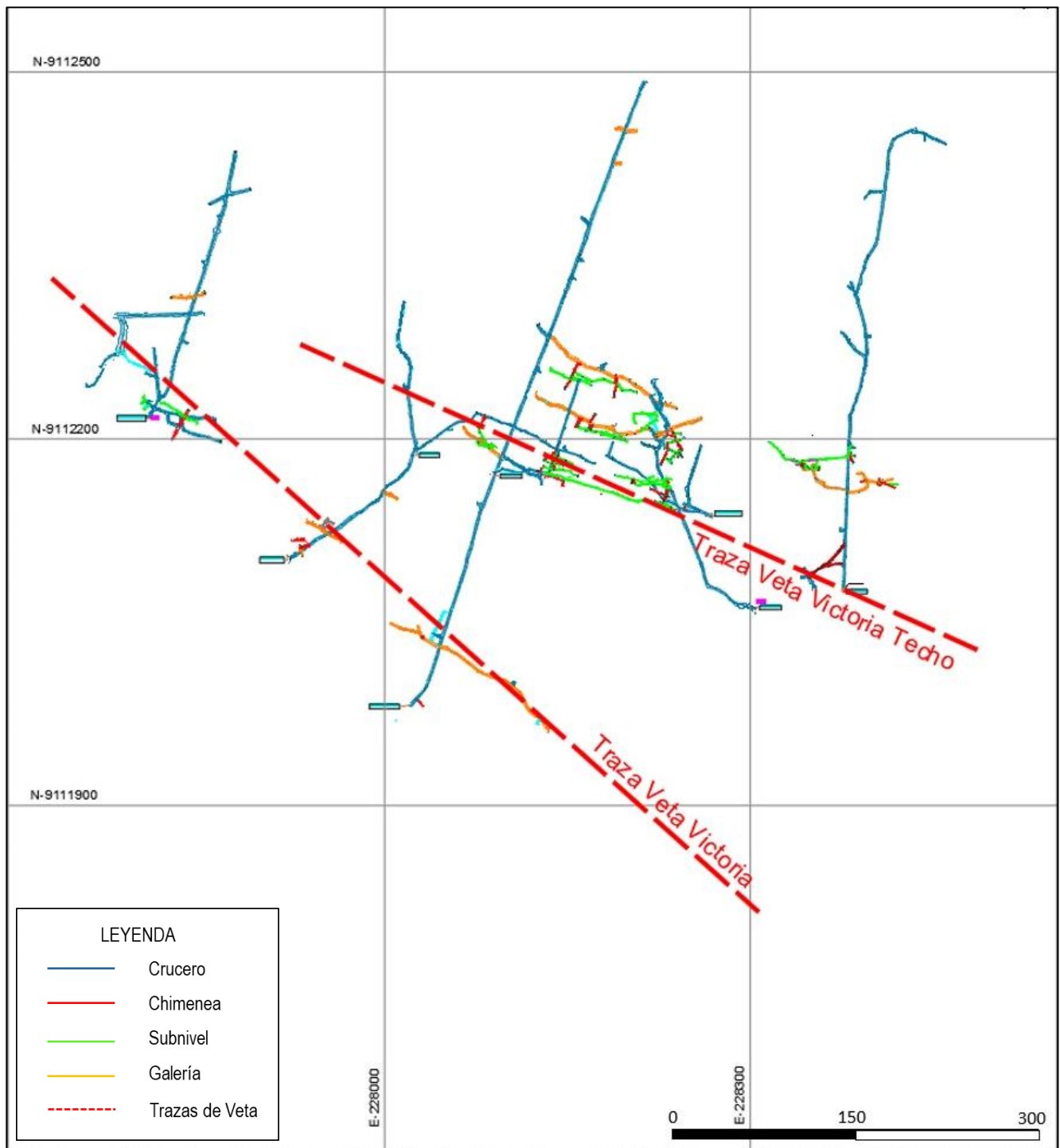
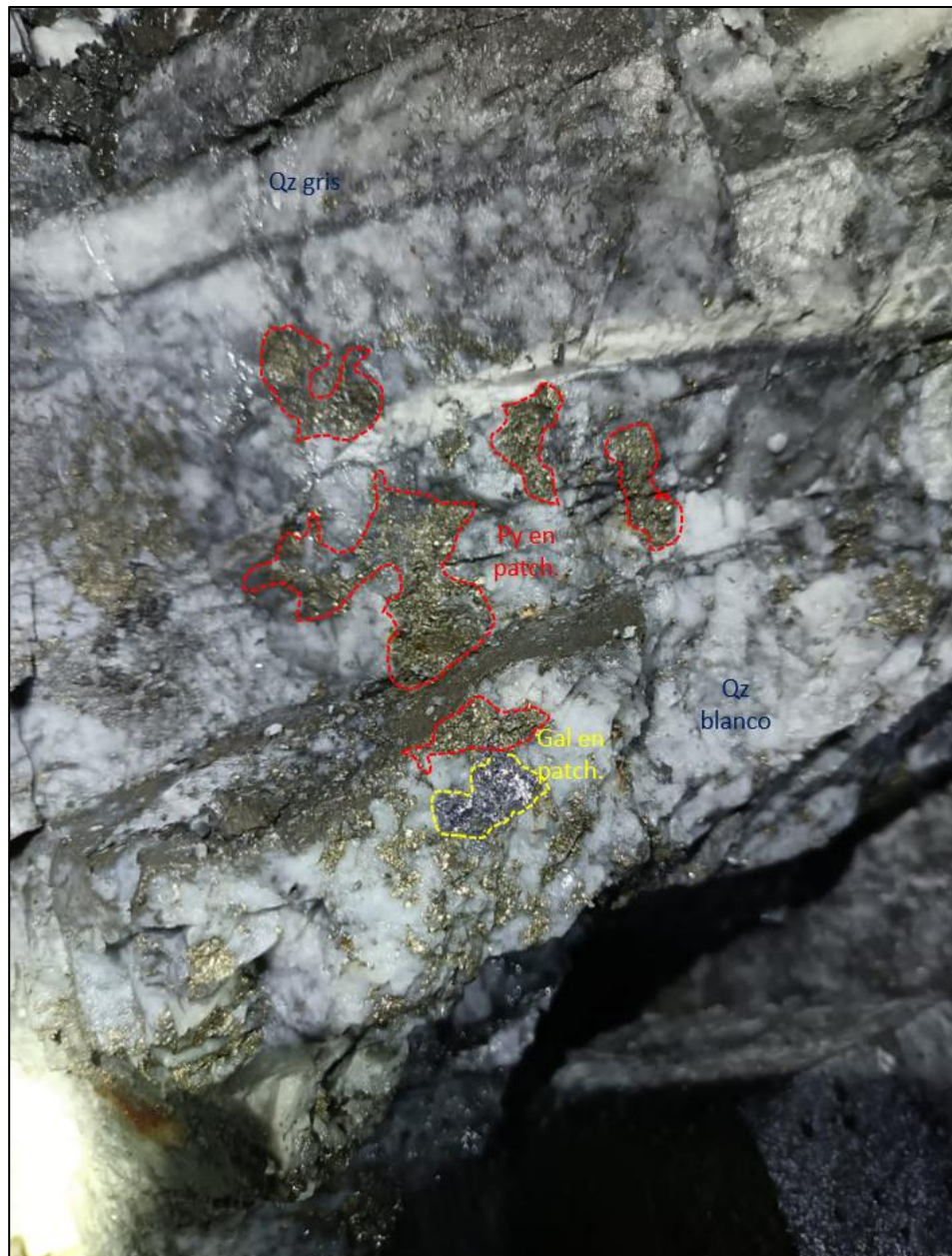


Figura 10. Sistema de Vetas Victoria y Victoria Techo.

➤ Veta Mercedes

- ***Azimut Promedio:*** 295°
- ***Buzamiento Promedio:*** 46 ° NE.
- ***Límites O Controles De La Veta:*** La veta Mercedes se localiza al techo de la Veta Victoria, presentando una orientación estructural de rumbo NW-SE, coherente con la dirección andina típica de las estructuras regionales. Su posición relativa respecto a la Veta Victoria indica que podría formar parte del mismo sistema hidrotermal, donde diferentes niveles de fracturación y apertura de espacios en la roca controlan la disposición de las vetas y su potencial mineralógico.

Desde el punto de vista tectónico, la ubicación de la Veta Mercedes en el techo de la Veta Victoria sugiere que pudo estar influenciada por los mismos controles estructurales mayores, incluyendo la falla San Francisco, la cual afecta directamente la geometría y continuidad del sistema Victoria. La persistencia de la Veta Mercedes y su paralelismo estructural con la Veta Victoria reflejan un control de orientación regional, característico de sistemas epitermales con mineralización de baja a moderada sulfidación, donde la circulación de fluidos hidrotermales y la precipitación de sulfuros y oro están determinadas por fracturas y planos de debilidad preexistentes.



Fotografía 6. Veta de cuarzo blanco y gris con mineralización de pirita y galena en parches.

- **Consideraciones Estructurales:** El sistema de vetas Mercedes se encuentra al techo de la Veta Victoria, constituyendo la última estructura localizada al norte del área de estudio. La veta presenta una morfología lenticular y de rosario, característica que sugiere episodios de apertura localizados y controlados por fracturas preexistentes. Esta geometría indica que la veta no es continua a lo largo de su rumbo, sino que se desarrolla como un conjunto de lentes o cuerpos discontinuos, lo cual tiene implicancias directas en la distribución de la mineralización y la planificación de muestreos.

La Veta Mercedes muestra sectores con apertura de mineralización económica, donde se concentra el oro asociado a sulfuros, así como zonas con cuarzo estéril, reflejando la variabilidad espacial de la mineralización dentro de la misma estructura. Estudios mineralógicos y texturales sugieren que la depositación de la veta se produjo en dos etapas hidrotermales: inicialmente, un fluido precursor depositó cuarzo blanco estéril, sin presencia significativa de sulfuros; posteriormente, un segundo fluido transportador de metales se infiltró en las fracturas, generando la mineralización aurífera.

Este segundo evento hidrotermal se manifiesta mediante textura bandeada, donde se observan parches de pirita y galena asociados a zonas de oro, evidenciando un control estructural y químico preciso en la precipitación de sulfuros y metales preciosos. La combinación de la morfología lenticular, la zonación mineralógica y la depositación por episodios fluidos indica que la Veta Mercedes constituye una estructura superior de alto interés económico, cuya caracterización mineralógica y estructural es fundamental para comprender la dinámica de mineralización del sistema Victoria y orientar futuras exploraciones en el área.

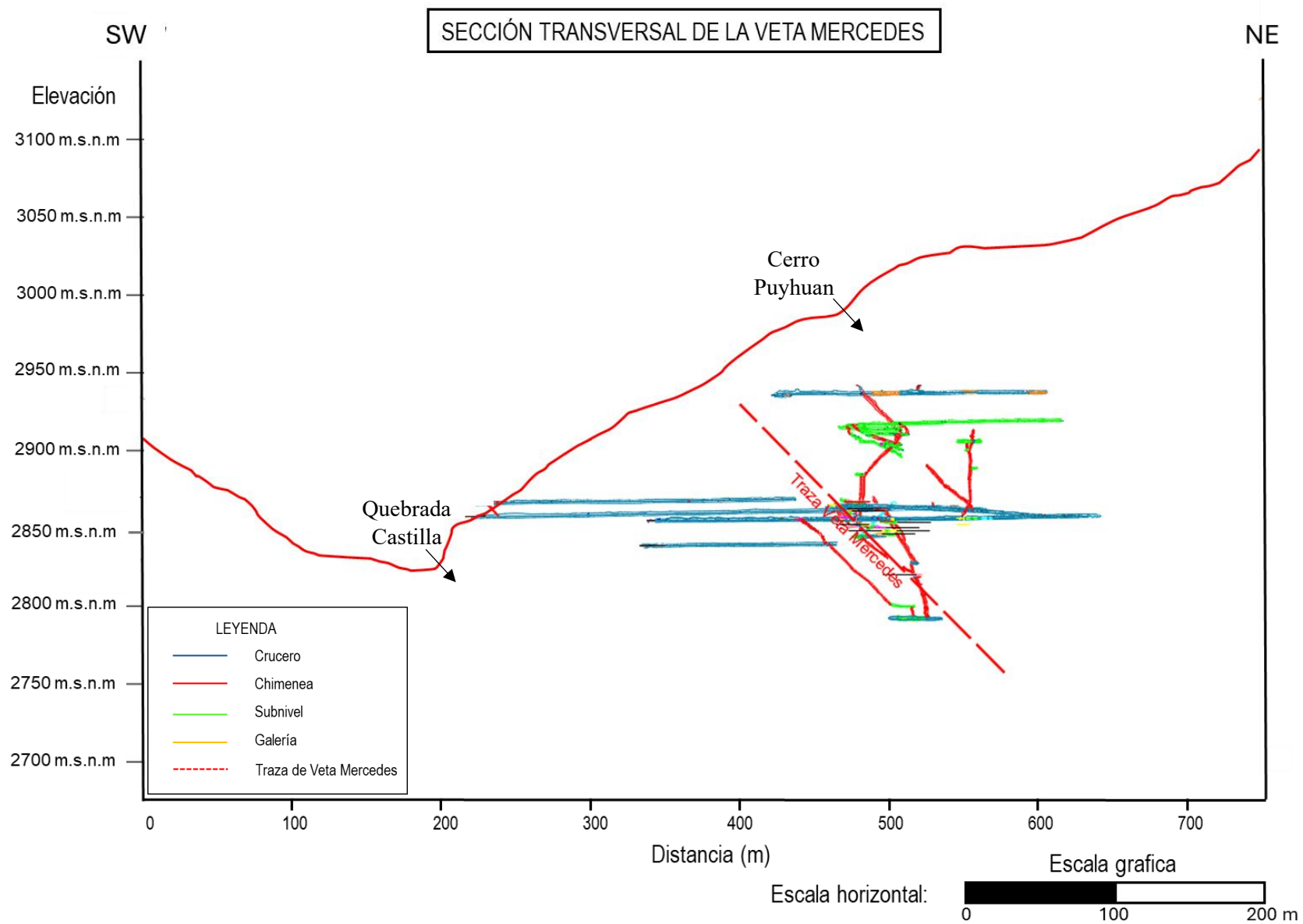


Figura 11. Sección transversal de la proyección de la Veta Mercedes en la zona de Puyhuan.

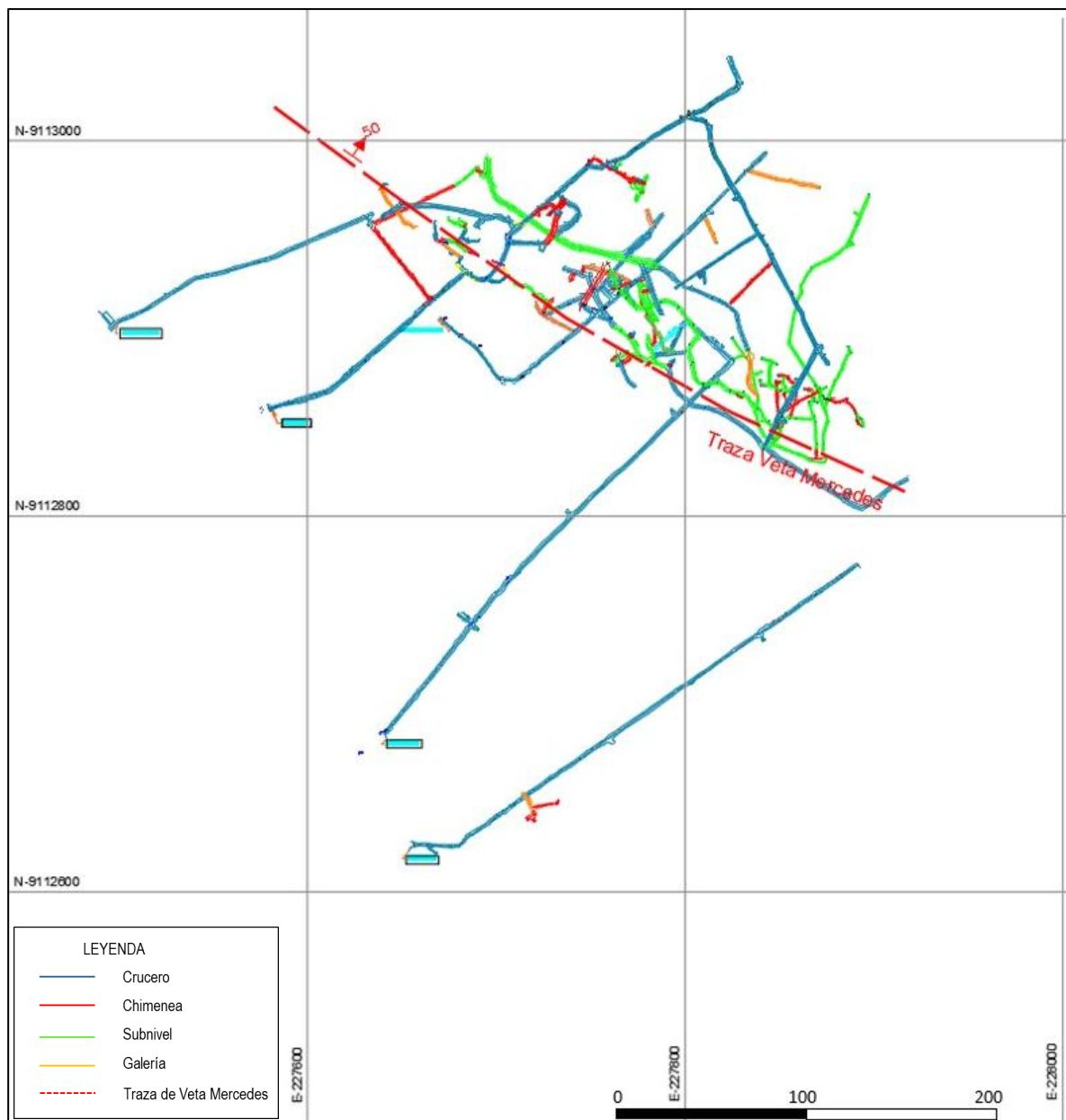


Figura 12. Proyección de Veta Mercedes - Vista en Planta

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. MODELAMIENTO GEOLÓGICO

El modelamiento geológico constituye una etapa fundamental en la estimación de recursos minerales, ya que permite representar en un entorno tridimensional la distribución espacial de las unidades geológicas, estructuras y zonas mineralizadas. Este modelo integra la información recolectada en campo, los registros de muestreo en canales, mapeos geológicos de galerías, datos estructurales y resultados geoquímicos.

El desarrollo del modelo geológico para las vetas Victoria y Mercedes se llevó a cabo utilizando el software Leapfrog Geo, el cual permite la generación de superficies geológicas implícitas a partir de datos espaciales interpretados. El objetivo principal fue definir de forma precisa los cuerpos mineralizados, sus controles geológicos y las unidades litológicas asociadas, lo cual sienta las bases para un cálculo confiable de recursos minerales.

4.1.1. Modelamiento Litológico

El modelamiento litológico se enfocó en la construcción de sólidos tridimensionales que representan las diferentes unidades de roca presentes en el área de estudio. Se definieron dominios geológicos basados en la litología y características estructurales, con el fin de controlar la interpolación de las leyes de mineralización.

Se importaron los datos de campo que contenían información sobre la litología interpretada durante el mapeo. Se crearon superficies de contacto entre las diferentes unidades litológicas mediante la interpolación de los puntos de contacto registrados en el muestreo. Se utilizaron técnicas de interpolación implícita, que permiten generar superficies complejas a partir de datos dispersos.

Se refinaron las superficies de contacto utilizando información adicional proveniente del mapeo geológico de las labores subterráneas, lo que permitió ajustar el modelo a las observaciones de campo.

Se generaron sólidos 3D cerrados que representan el volumen de cada unidad litológica. Estos sólidos fueron validados visualmente para asegurar su coherencia.

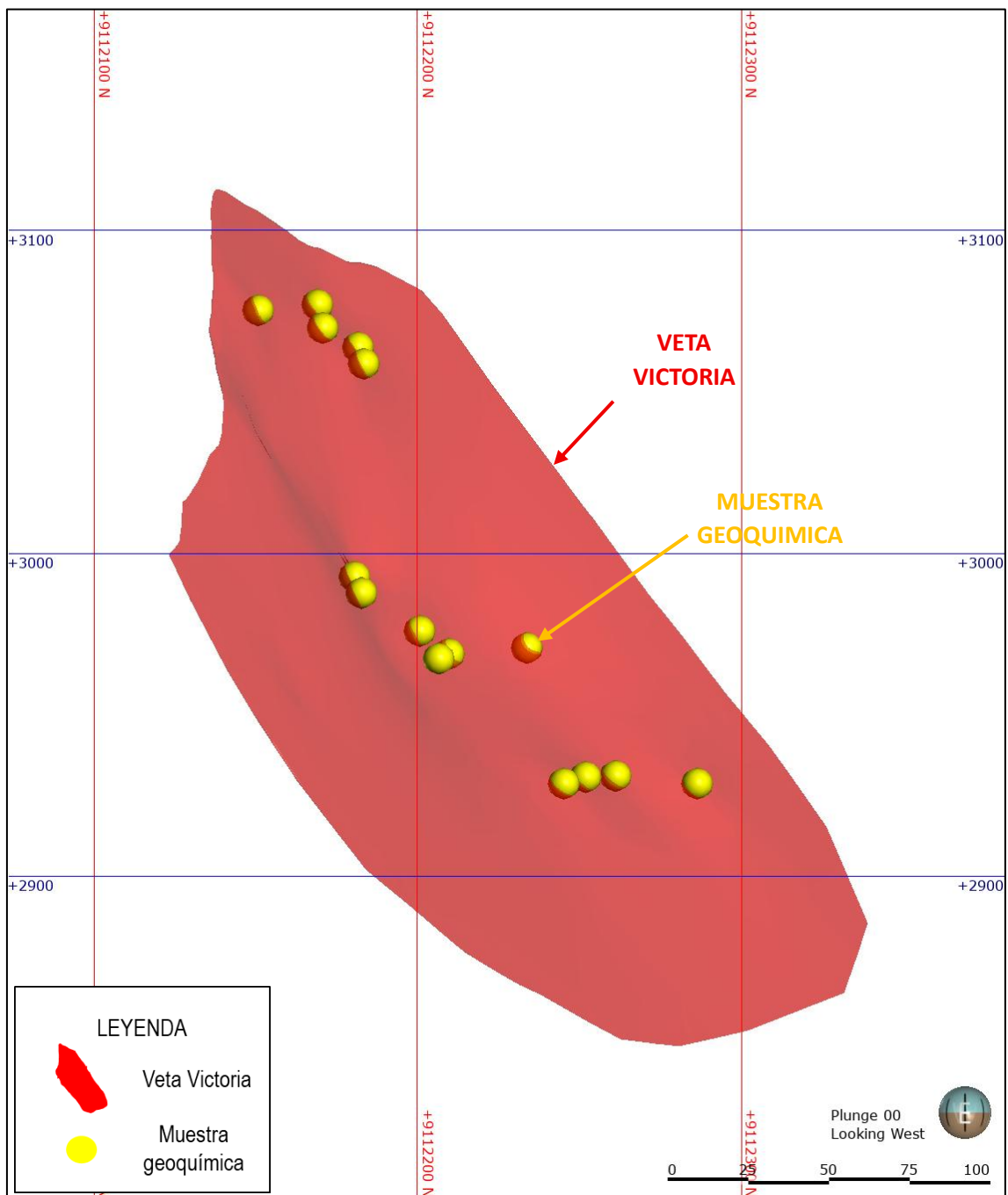


Figura 13. Se observa la veta Victoria de color rojo realizada desde el mapeo litológico y de amarillo se presenta los puntos de muestreo geoquímico para esta estructura.

➤ Fuentes de Información Utilizadas

El modelamiento litológico se basó en los siguientes insumos:

- Mapeo geológico subterráneo a escala 1:250 realizado entre los niveles 2870 y 3300 m.s.n.m.
- Observaciones directas de afloramientos y muestreo de canal en vetas.

➤ Identificación de Unidades Litológicas

Se identificaron principalmente dos unidades:

- **Granodiorita:** Roca predominante del batolito de Pataz, altamente fracturada, con alteración hidrotermal intensa en zonas de vetas.
- **Volcanoclásticos:** Rocas compuestas predominantemente por fragmentos de origen volcánico (clastos), generados tanto por erupciones explosivas como por la desintegración mecánica de rocas preexistentes.

➤ Construcción del Modelo Litológico

El procedimiento ilustrado en el diagrama representa el flujo de trabajo adoptado para la construcción de un modelo geológico tridimensional mediante el software Leapfrog Geo, el cual se basa en metodologías de modelamiento implícito ampliamente utilizadas en geología aplicada. El proceso se inicia con la recopilación, depuración e importación de información geológica proveniente de diversas fuentes, tales como sondajes de exploración, mapeos geológicos de superficie y, cuando corresponde, datos estructurales y geofísicos. Estos datos constituyen la base fundamental sobre la cual se desarrolla el modelo geológico.

Una vez incorporada la información al software, se procede al modelamiento litológico, etapa en la cual se clasifican y organizan las distintas unidades de roca identificadas en el área de estudio. A partir de esta interpretación geológica, se definen los contactos litológicos entre las diferentes unidades, los cuales representan los límites espaciales que separan cada litología. Leapfrog Geo utiliza estos contactos como restricciones para llevar a cabo una interpolación implícita de superficies, generando representaciones continuas y coherentes de las interfaces geológicas en el espacio tridimensional.

El modelamiento implícito permite integrar de manera eficiente grandes volúmenes de datos, reduciendo la subjetividad asociada a los métodos tradicionales de interpretación

manual, y facilitando la actualización dinámica del modelo ante la incorporación de nueva información. Como resultado de este proceso, se obtienen superficies geológicas que delimitan las distintas unidades, las cuales son posteriormente utilizadas para la generación de sólidos tridimensionales que conforman el modelo geológico final.

Finalmente, el modelo tridimensional generado es sometido a un proceso de validación geológica, el cual consiste en la comparación del modelo con el mapeo geológico de terreno y otras observaciones independientes disponibles. Esta etapa es fundamental para verificar la consistencia geológica del modelo, identificar posibles inconsistencias o desviaciones respecto a la realidad del subsuelo y realizar los ajustes necesarios. De este modo, se asegura que el modelo geológico tridimensional final represente de manera fiel y confiable la geometría y distribución de las unidades litológicas del área de estudio, constituyendo una herramienta robusta para posteriores análisis geológicos, evaluación de recursos y toma de decisiones.

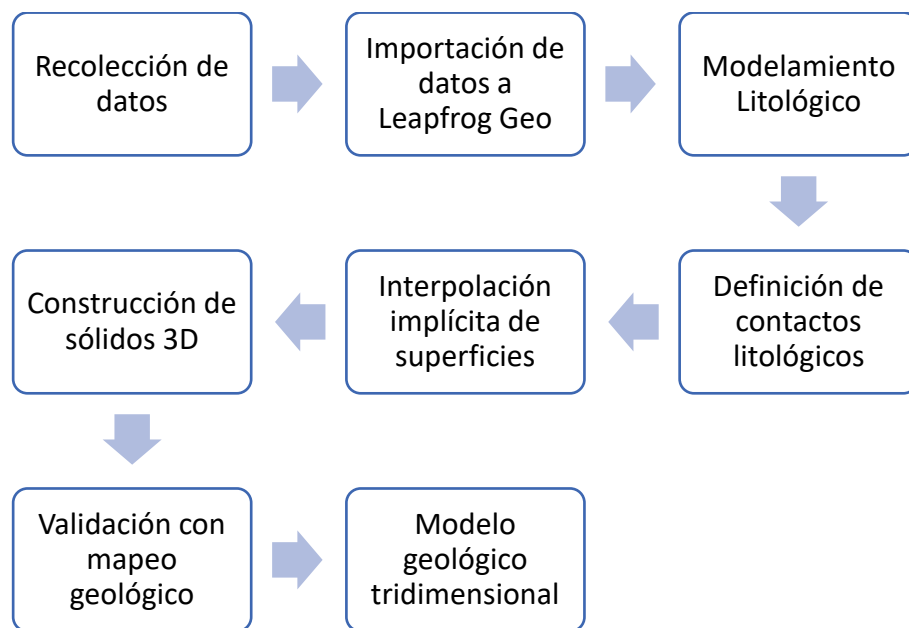


Figura 14. Proceso utilizado para realizar el modelo geológico tridimensional.

Se generaron secciones geológicas a lo largo del rumbo de las vetas, revelando la disposición y contacto de las unidades. El modelo evidenció la asociación directa entre zonas de granodiorita intensamente alterada y la presencia de vetas auríferas

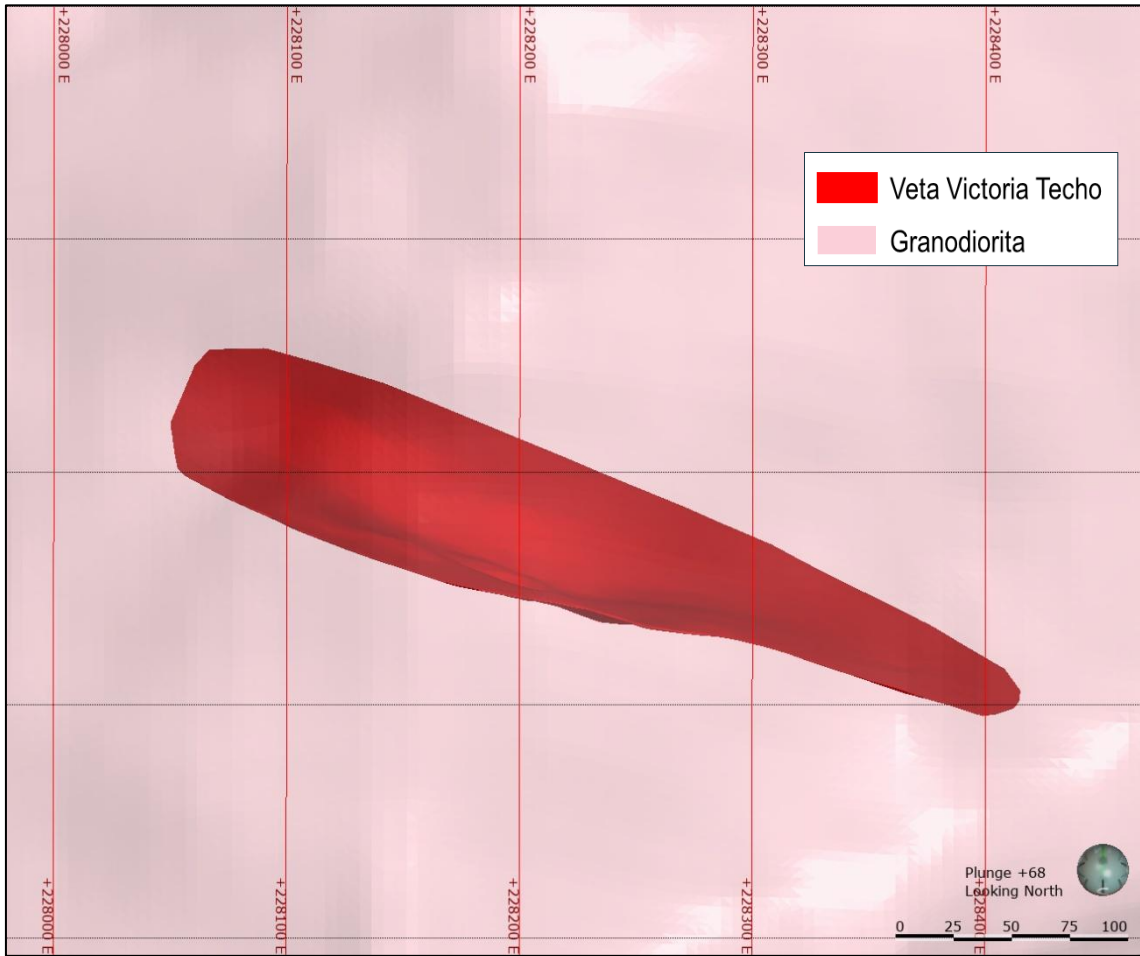


Figura 15. Vista al norte de la veta Victoria Techo (de color rojo).

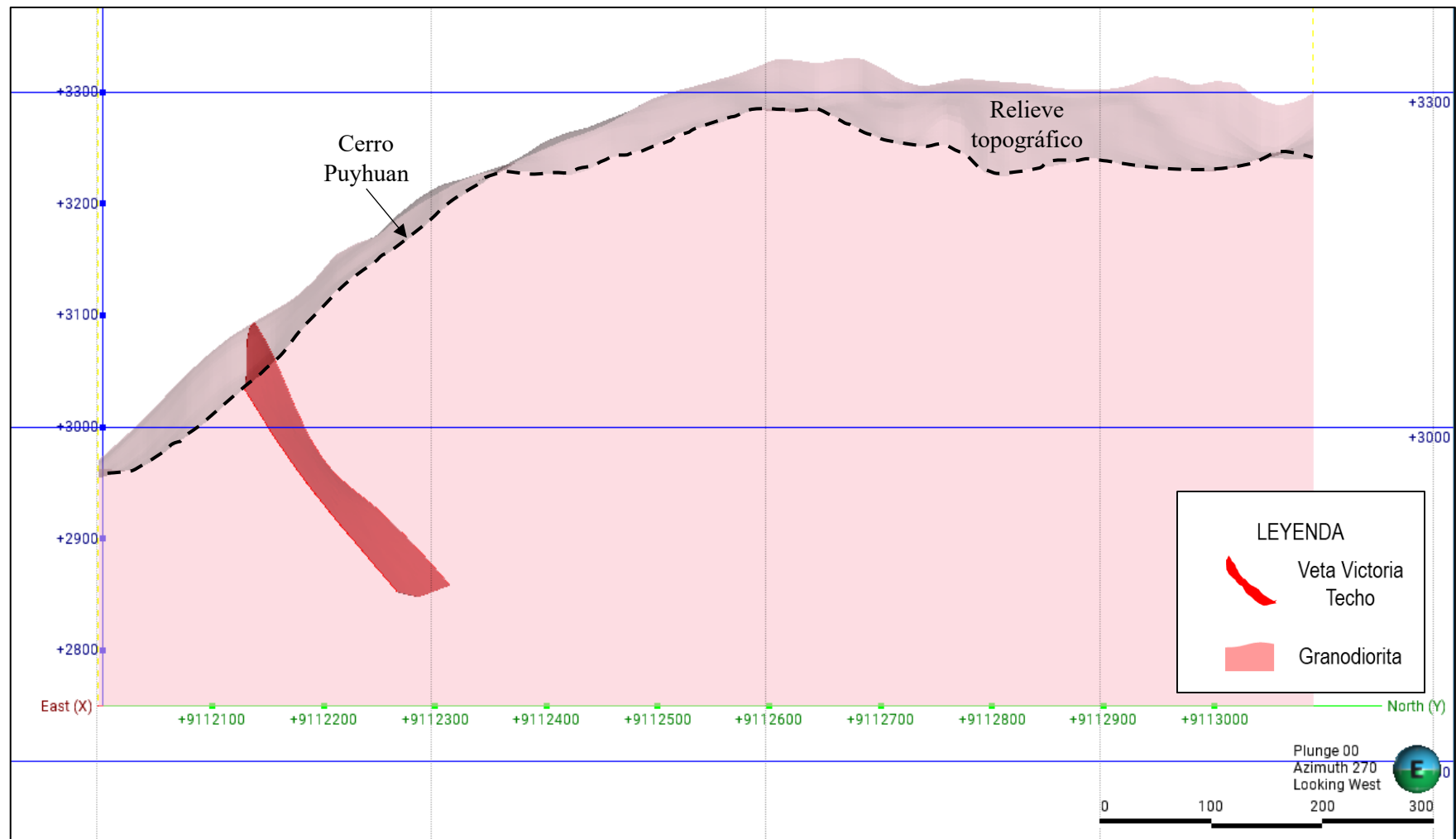


Figura 16. Vista al oeste de la veta Victoria Techo (de color rojo)

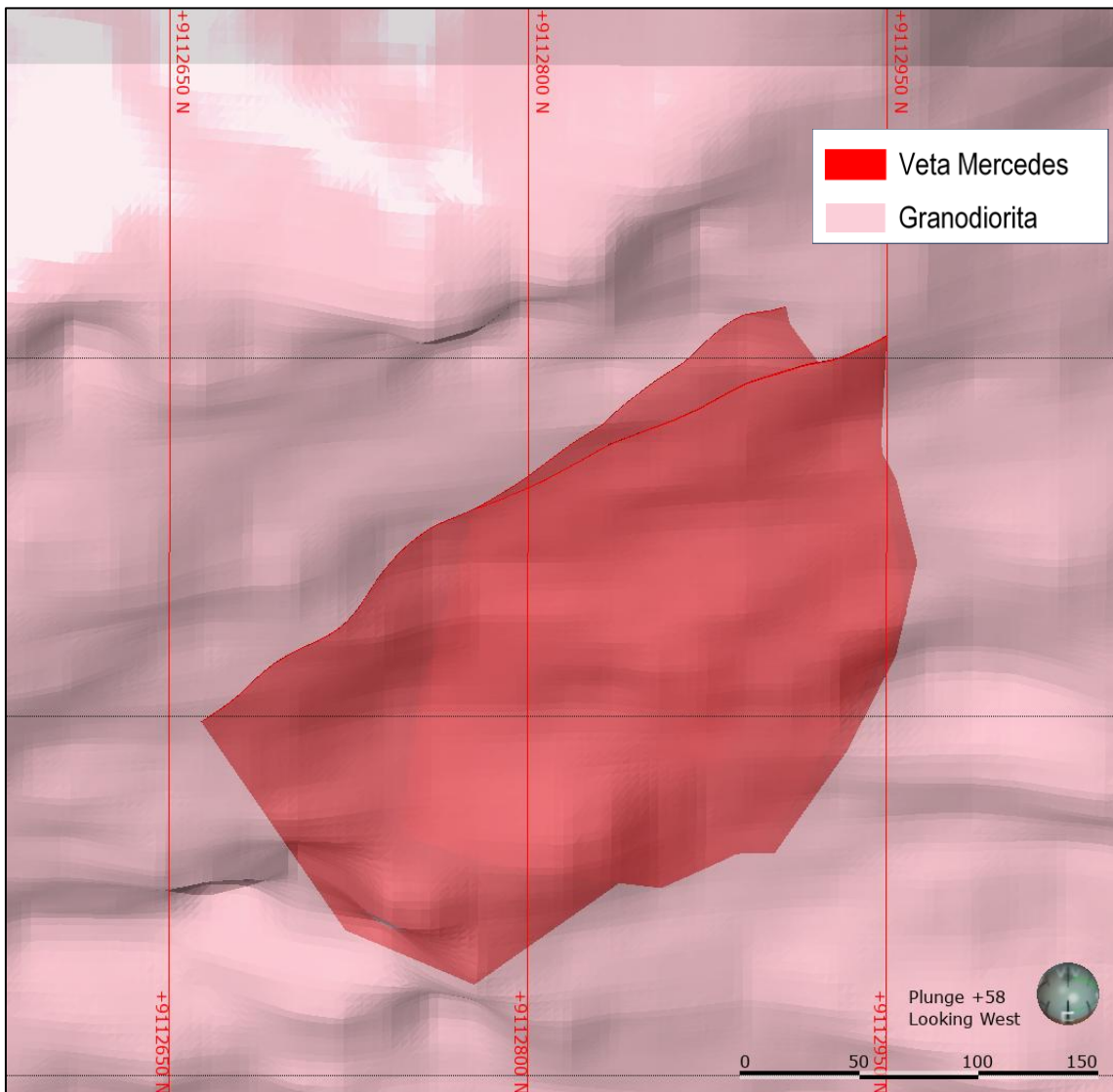


Figura 17. Vista tridimensional al Oeste de la veta Mercedes (de color rojo)

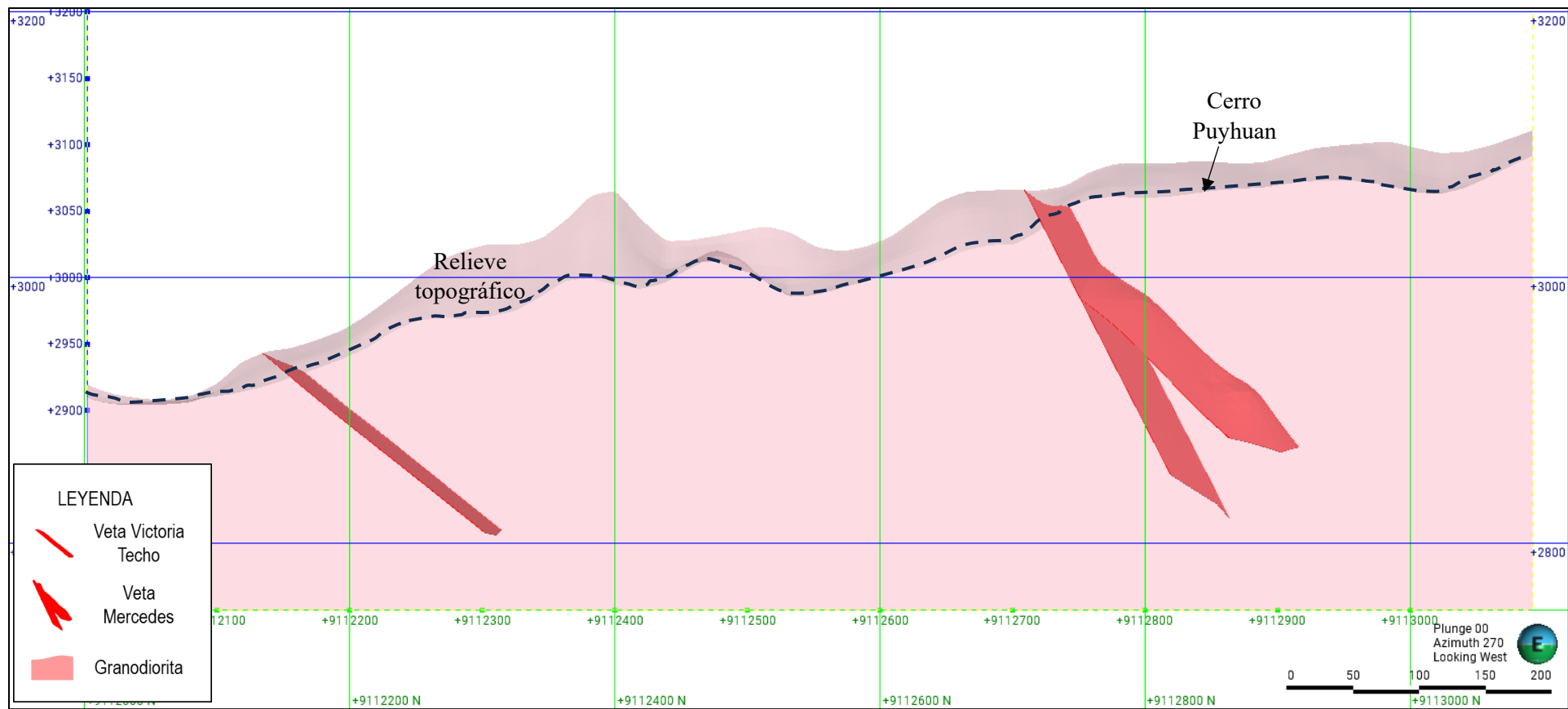


Figura 18. Vista al oeste de las vetas Victoria Techo (izquierda) y Mercedes (derecha), ambas representadas de color rojo.

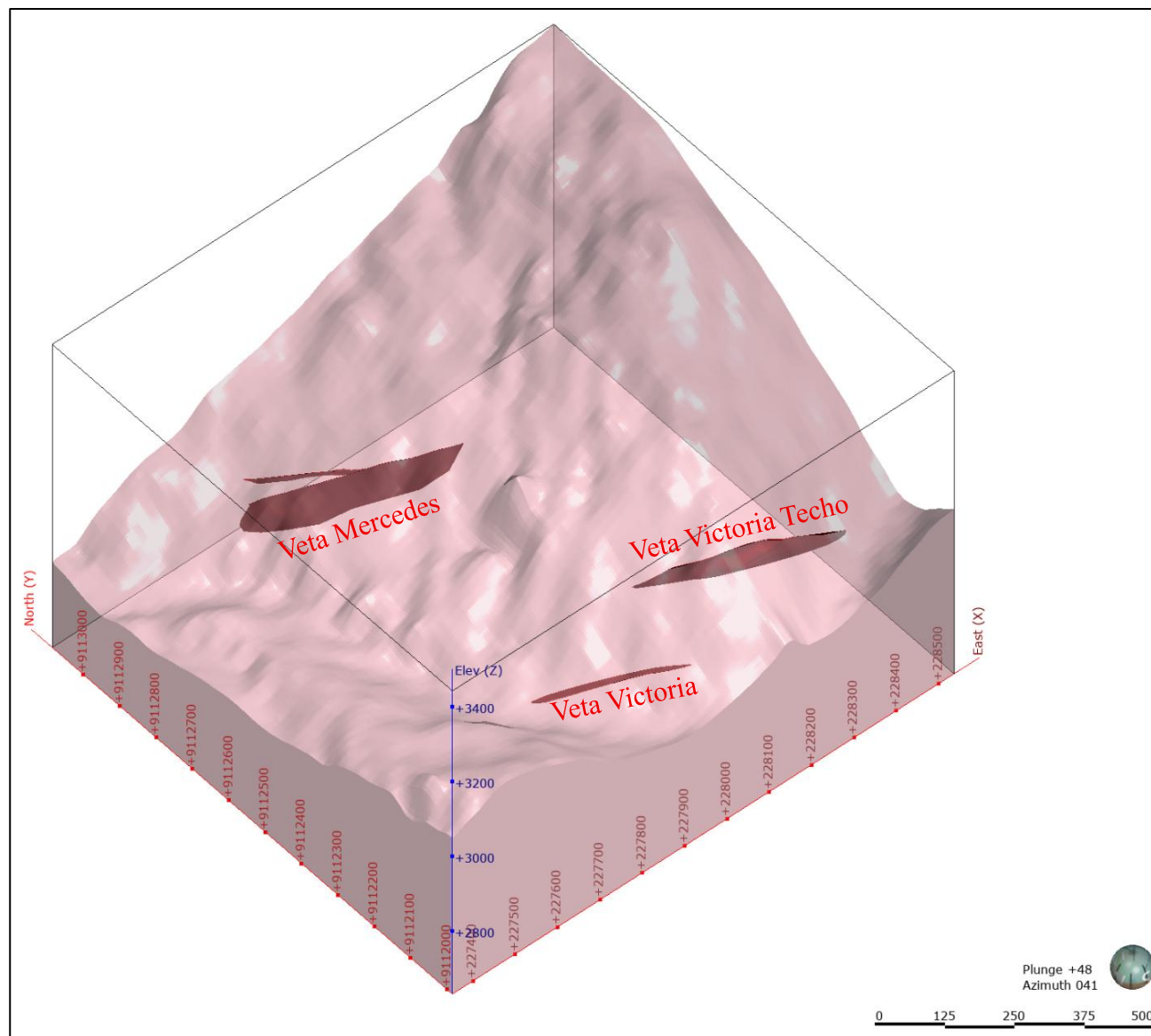


Figura 19. La imagen muestra un modelo tridimensional, donde se representan tres vetas mineralizadas principales: Veta Mercedes, Veta Victoria, y Veta Victoria Techo.

4.1.2. Modelamiento Mineralógico

El modelamiento mineralógico tuvo como objetivo estimar la distribución tridimensional de la mineralización de oro dentro de las vetas Victoria, Victoria Techo y Mercedes. Se utilizó el método geoestadístico de kriging para interpolar las leyes de oro, ya que este método considera la continuidad espacial de la mineralización y proporciona estimaciones más precisas que los métodos determinísticos.

Se definió un modelo de bloques tridimensional que abarca las vetas Victoria y Mercedes. El tamaño de los bloques se determinó en función de la densidad de los datos y el tamaño mínimo de explotación.

Se aplicó el método de kriging ordinario para estimar las leyes de oro en cada bloque del modelo. Se utilizaron los variogramas modelados.

Se validó el modelo de bloques mediante técnicas de visualización y comparación con los datos de leyes de oro originales. Se evaluaron la precisión y la exactitud de las estimaciones.

➤ Ensamblajes Mineralógicos Predominantes

La mineralización está representada por asociaciones del tipo:

- **Cuarzo + Pirita + Oro:** Ensamble principal de la zona económica.
- **Clorita + Calcita + Sericita ± Galena ± Esfalerita:** Minerales accesorios presentes en halos de alteración.

➤ Interpretación de Zonas Mineralizadas

A través de la integración de los datos geoquímicos, mapeo estructural y alteración, se delimitó la zona económicamente mineralizada, caracterizada por:

- Alta silicificación central, en forma de caballos estructurales dentro de la veta.
- Halos de cloritización circundantes que reflejan alta temperatura de precipitación.
- Presencia de brechas tectónicas con clastos angulosos y matriz de cuarzo-pirita, que indican eventos sinérgicos de mineralización y tectonismo.

➤ Validación y Ajustes del Modelo

El modelo fue validado mediante:

- Comparación visual entre secciones del modelo y resultados geoquímicos.
- Análisis de continuidad entre bloques mineralizados.

El modelo mineralógico generado es consistente con el contexto geológico del depósito orogénico, y cumple con los requisitos de precisión y realismo geológico necesarios para el posterior cálculo de recursos minerales.

4.2. CÁLCULO DE RECURSOS

El cálculo de recursos se llevó a cabo utilizando los modelos geológicos tridimensionales generados previamente, y se fundamentó en los principios del Código JORC (2012) para asegurar la transparencia, competencia y materialidad en la declaración de los resultados. Un componente esencial de este proceso fue la correcta utilización del modelo de bloques, el cual sirvió como base para la estimación de recursos.

El proceso seguido en Leapfrog Geo incluyó:

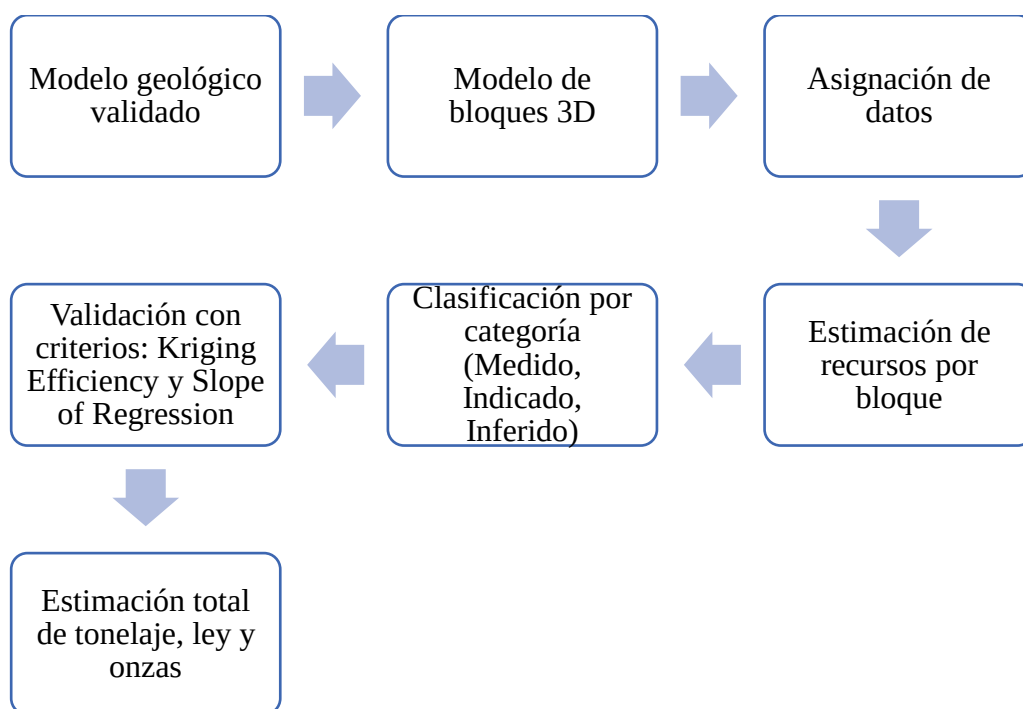


Figura 20. Proceso utilizado para la estimación de recursos minerales.

4.2.1. Modelo de Bloques como Fundamento para la Estimación

El modelo de bloques consistió en una representación tridimensional del yacimiento, dividido en celdas regulares (0.25m * 0.25m * 0.25m). Cada bloque almacenó información relevante para la estimación de recursos, incluyendo:

- **Leyes de oro (Au):** Estimadas mediante métodos geoestadísticos (kriging) a partir de los datos de muestreo con leyes promedio entre 2.56 y 15.31 g/t de oro.
- **Densidad:** Asignada a cada bloque en función a información compartida por el área de metalurgia 2.6 gr/cm³
- **Categoría de recurso:** Inicialmente asignada según la confianza geológica (Inferido, Indicado, Medido).

4.2.2. Estimación de Recursos Minerales

La estimación de recursos se realizó directamente sobre el modelo de bloques:

Se calcularon el tonelaje y el contenido de oro para cada bloque.

Los recursos se clasificaron en las categorías de Inferidos, Indicados y Medidos, basándose en la distancia de influencia de los datos de muestreo y la continuidad geológica modelada.

4.2.3. Validación y Clasificación de Recursos

Los recursos estimados se clasificaron como:

- **Recursos Medidos:** Sectores donde la densidad de muestreo es muy alta, el control geológico y estructural es excelente, y la variabilidad local del depósito está muy bien entendida. La información es tan confiable que permite estimaciones muy precisas de tonelaje y ley, con muy baja incertidumbre.
- **Recursos Indicados:** Sectores con alta densidad de muestreo y control estructural definido, donde la continuidad geológica y de leyes es razonablemente predecible, pero con un nivel de confianza algo menor que en los recursos medidos.

- **Recursos Inferidos:** Áreas con menor densidad de datos, donde aún existe una continuidad geológica razonable inferida, pero con un mayor grado de incertidumbre en cuanto a tonelaje y ley.

Para la clasificación del recurso mineral en este yacimiento orogénico en las vetas Victoria, Victoria Techo y Mercedes, se realizó la representación de la estimación y clasificación del recurso mineral en categorías de Recurso Medido, Indicado e Inferido, en función del nivel de confianza geológica, la densidad y la continuidad interpretada de la mineralización. La zonación de colores rojo (Recurso Medido), amarillo (Recurso Indicado), verde (Recurso Inferido) y celeste (No clasificado), refleja la variación del grado de certidumbre asociado a cada categoría, destacando los núcleos de mayor continuidad estructural y control litológico característicos de este tipo de yacimiento. Los puntos corresponden a datos de muestreos que sustentan la interpretación y la clasificación del recurso. Para un mejor entendimiento ver Figuras 21, 22 y 23.

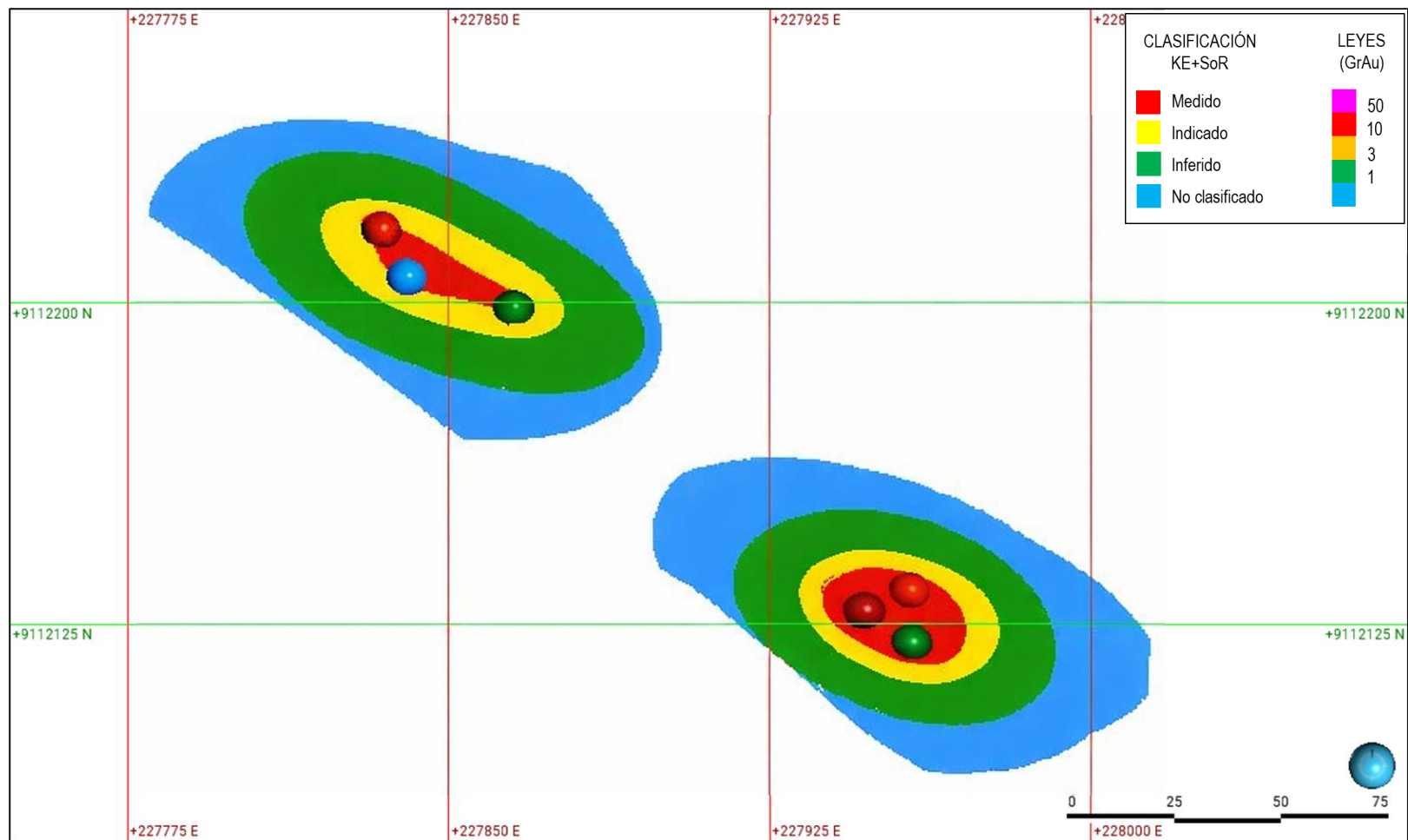


Figura 21. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Victoria: rojo (recurso medido), amarillo (indicado), verde (inferido) y celeste (no clasificado). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso.

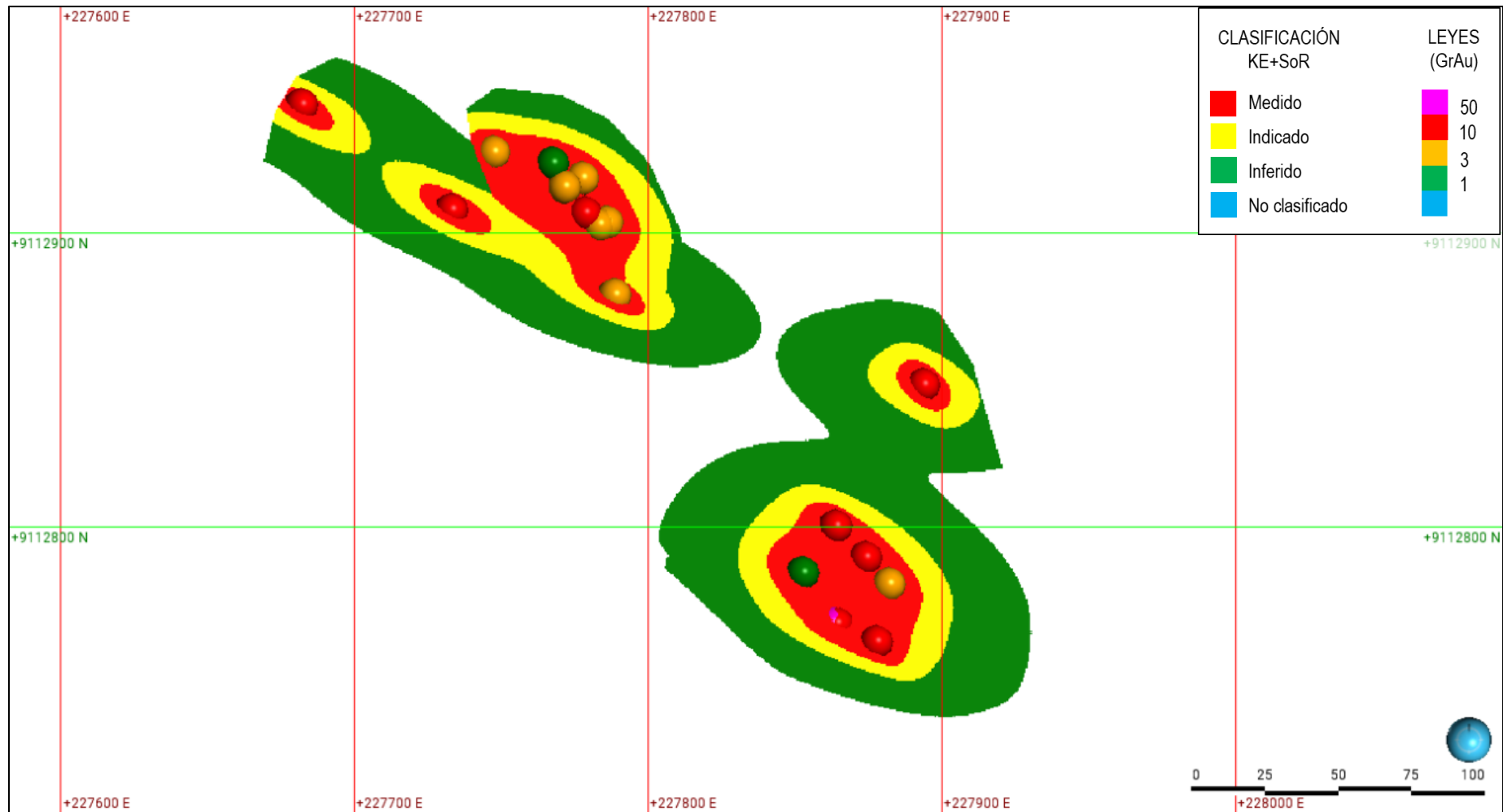


Figura 22. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Mercedes: rojo (recurso medido), amarillo (indicado) y verde (inferido). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso.

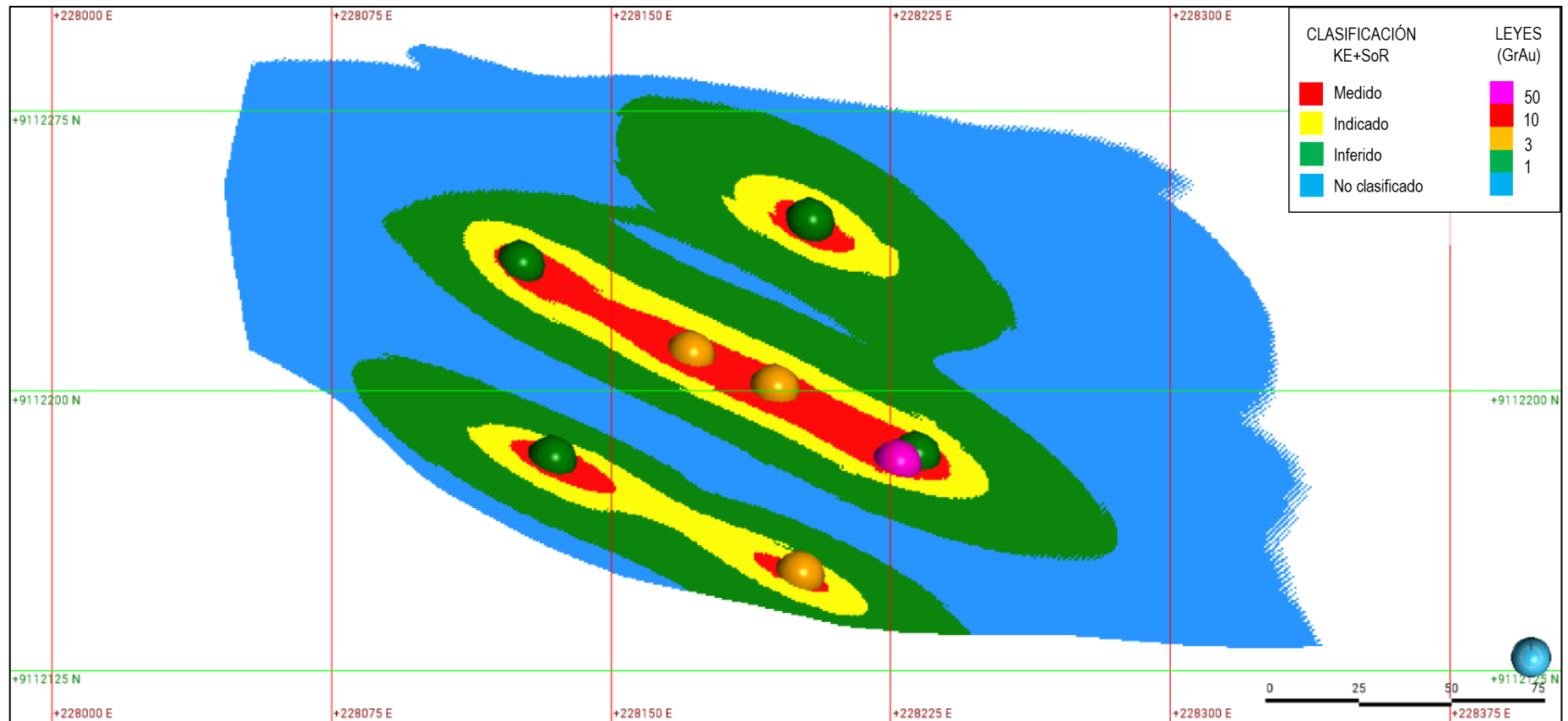


Figura 23. La imagen presenta una validación visual de la clasificación de recursos minerales para la veta Victoria Techo: rojo (recurso medido), amarillo (indicado), verde (inferido) y celeste (no clasificado). Se observa una distribución coherente, donde los recursos de mayor confianza (medidos) están rodeados por recursos de menor confianza, validando la adecuada transición y modelado del recurso

4.2.4. Consideraciones Técnicas

Las leyes y tonelajes son estimaciones basadas en datos actuales y están sujetas a cambios conforme se obtenga nueva información.

No se aplicaron factores de recuperación metalúrgica ni diluciones operativas, dado que el objetivo fue estimar recursos minerales y no reservas probadas.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del modelamiento geológico y del cálculo de recursos minerales han permitido una caracterización detallada del potencial económico de las vetas Victoria y Mercedes en la zona de Puyhuan. A continuación, se discuten los aspectos más relevantes del proceso:

4.3.1. Geometría y Continuidad de las Vetos

Las vetas Victoria y Mercedes muestran una morfología típica de depósitos orogénicos, con una geometría controlada estructuralmente, orientaciones dominantes en dirección NW-SE y buzamientos al NE. La continuidad a lo largo del rumbo y en profundidad fue confirmada tanto en los mapeos subterráneos como en los registros de perforación, lo que permitió construir modelos tridimensionales coherentes y realistas.

4.3.2. Distribución de Mineralización

El modelamiento mineralógico reveló que la mineralización está principalmente asociada a zonas de intensa silicificación. Esto refuerza la idea de múltiples pulsos hidrotermales y una génesis compleja, pero coherente con la evolución tectónica del Batolito de Pataz.

4.3.3. Estimación de Recursos y su Confiabilidad

El tonelaje total estimado del yacimiento asciende a 115 591,98 toneladas de mineral, con leyes promedio de oro que varían entre 2,56 y 15,31 g/t. Estos resultados permiten clasificar al proyecto dentro de una categoría de explotación de mediana escala, evidenciando un potencial geológico favorable para el desarrollo de futuras fases de

exploración y eventual ampliación de las operaciones extractivas. La variabilidad observada en las leyes refleja la complejidad geológica del depósito y resalta la importancia de un modelamiento geológico y geoestadístico adecuado para una correcta evaluación del recurso.

La categorización de los recursos minerales en las clases de “recursos indicados” e “inferidos” se fundamenta en la densidad espacial de la información disponible, la continuidad geológica y la confiabilidad de los modelos geológicos y geoestadísticos desarrollados. Esta clasificación se realizó en concordancia con las directrices establecidas por el Código JORC (Joint Ore Reserves Committee), el cual proporciona un marco internacionalmente aceptado para la declaración transparente y consistente de recursos minerales.

Adicionalmente, la clasificación de los recursos fue respaldada mediante criterios cuantitativos derivados del proceso de estimación geoestadística, específicamente a través del análisis de los parámetros Kriging Efficiency (KE) y Slope of Regression (SoR). Estos indicadores permiten evaluar el grado de confiabilidad y la calidad de las estimaciones de bloques, midiendo la eficiencia del método de kriging y la relación entre valores estimados y valores reales. La aplicación conjunta de estos parámetros garantiza una validación objetiva adicional del nivel de confianza asignado a cada categoría de recurso, fortaleciendo la robustez técnica de la estimación y la consistencia de los resultados obtenidos.

Calculations



Figura 24. Configuración para la clasificación de recursos minerales en la estimación

Se muestra la configuración utilizada para la clasificación de los recursos minerales en la estimación, basada en los parámetros de Kriging Efficiency (KE) y Slope of Regression (SoR). A través de condiciones lógicas, se asignan las categorías de confianza del recurso: Medido, Indicado, Inferido y No Clasificado.

La primera sección corresponde a la clasificación a partir del valor de KE, donde se establecen rangos ≥ 0.8 para recursos Medidos, entre 0.5 y < 0.8 para Indicados, entre 0.2 y < 0.5 para Inferidos, dejando como No Clasificado los valores que no cumplen estos rangos.

La segunda sección clasifica según SoR en base a límites entre 1.1, 0.9, 0.75 y 0.25, siguiendo criterios equivalentes de confianza geológica.

Finalmente, se presenta una clasificación combinada KE + SoR, que integra ambos parámetros para una mejor representación del nivel de certidumbre del modelo de bloques. La asignación de categorías se realiza únicamente cuando ambos indicadores cumplen los rangos definidos para cada clase de recurso.

Tabla 3. Criterios para la clasificación de recursos minerales

Categoría	Criterio aplicado (KE y SoR)
Medido	$KE \geq 0.8$ o $0.9 \leq SoR \leq 1.1$
Indicado	$0.5 \leq KE < 0.8$ o $(0.75 \leq SoR < 0.9$ o $1.1 < SoR < 1.25)$
Inferido	$0.2 \leq KE < 0.5$ o $(0.25 \leq SoR < 0.75$ o $1.25 \leq SoR < 1.5)$
No clasificado	Si no cumple ninguno de los criterios anteriores.

Name
Report v

Select Columns

Blocks

☒ Block size is in metres
☐ Block size is in feet

Density:

Constant value

2.6

Density unit:

g/cm³

Options

☒ Show material content
☒ Show empty rows
☐ Show volume column
☐ Show density column

Column Properties

Class KE + SoR

Heading:

Class KE + SoR

☒ Show total

Visible categories:

☒

Indicado

☒

Inferido

☒

Medido

☐

No Clasificado

Title:

Veta Victoria

Cut-off:

<None>

0.00

☐ Report below (<) cut-off

Filter:

<None>

Click on the columns below to edit them, or click and drag to reorder.

Class KE + SoR	Mass	Average Value	Material Content
		KO, Au_V	KO, Au_V
	t	g/t	t. oz
Indicado	653.32	2.35	49.33
Inferido	8,772.06	2.58	728.32
Medido	1,616.43	2.54	131.79
Total	11,041.81	2.56	909.44

Figura 25. Reporte de recursos minerales de la Veta Victoria

81

La figura presenta el resultado del reporte de recursos minerales para la Veta Victoria, donde se aplicó la clasificación basada en los parámetros combinados Kriging Efficiency (KE) y Slope of Regression (SoR). El reporte detalla el tonelaje (Tm), el valor promedio de ley (Gr/Tn) y el contenido metálico estimado (Onzas troy) para cada categoría de confianza del recurso: indicado, medido e inferido

Se utilizó una densidad constante de 2.6 g/cm³ para la conversión de volumen a tonelaje. Además, se habilitó la visualización del contenido metálico con el fin de cuantificar la estimación de oro asociada a cada categoría. Los resultados muestran un total estimado de 11 041.81 Tm, con una ley promedio global de 2.56 Gr/Tn, que corresponde a un contenido metálico total aproximado de 909.44 oz t.

Este reporte constituye la síntesis de la clasificación final del modelo de bloques, permitiendo evaluar la distribución del recurso en función del nivel de confianza geológico.

Tabla 4. Clasificación de recursos minerales de la veta Victoria.

VETA VICTORIA			
RECURSO	Masa	Ley promedio	Material contenido
	t	g/t	t. oz
Indicado	653.32	2.35	49.33
Inferido	8,772.06	2.58	728.32
Medido	1,616.43	2.54	131.79
Total	11,041.81	2.56	909.44

Name
Report VT

Select Columns

Blocks

☒ Block size is in metres
☐ Block size is in feet

Density:
Constant value
2.6

Density unit:
g/cm³

Options

☒ Show material content
☒ Show empty rows
☐ Show volume column
☐ Show density column

Column Properties

Class KE SoR

Heading:
Class KE SoR

☒ Show total

Visible categories:

☒ Indicado
☒ Inferido
☒ Medido
☐ No Clasificado

Title: Veta Victoria Techo

Cut-off:
<None>
0.00
☐ Report below (<) cut-off

Filter:
<None>

Click on the columns below to edit them, or click and drag to reorder.

Class KE SoR	Mass	Average Value	Material Content
		KO, Au VT	KO, Au VT
	t	g/t	t. oz
Indicado	9,328.26	3.26	977.43
Inferido	34,756.14	2.92	3,261.75
Medido	6,725.21	3.71	802.27
Total	50,809.61	3.09	5,041.45

Figura 26. Reporte de recursos minerales veta Victoria Techo.

La figura presenta el resultado del reporte de recursos minerales para la Veta Victoria Techo, donde se aplicó la clasificación basada en los parámetros combinados Kriging Efficiency (KE) y Slope of Regression (SoR). El reporte detalla el tonelaje (Tm), el valor promedio de ley (Gr/Tn) y el contenido metálico estimado (Onzas troy) para cada categoría de confianza del recurso: indicado, medido e inferido

Se utilizó una densidad constante de 2.6 g/cm³ para la conversión de volumen a tonelaje. Además, se habilitó la visualización del contenido metálico con el fin de cuantificar la estimación de oro asociada a cada categoría. Los resultados muestran un total estimado de 50 809.61 Tm, con una ley promedio global de 3.09 Gr/Tn, que corresponde a un contenido metálico total aproximado de 5041.45 oz t.

Este reporte constituye la síntesis de la clasificación final del modelo de bloques, permitiendo evaluar la distribución del recurso en función del nivel de confianza geológico.

Tabla 5. Clasificación de recursos minerales de la veta Victoria Techo.

VETA VICTORIA TECHO			
RECURSO	Masa	Ley promedio	Material contenido
	t	g/t	t. oz
Indicado	9328.26	3.26	977.43
Inferido	34,756.14	2.92	3261.75
Medido	6,725.21	3.71	802.27
Total	50,809.61	3.09	5041.45

Name
Report

Select Columns

Blocks

☒ Block size is in metres
☐ Block size is in feet

Density:
Constant value
2.6

Density unit:
g/cm³

Options

☒ Show material content
☒ Show empty rows
☐ Show volume column
☐ Show density column

Column Properties

Class KE + SoR

Heading:
Class KE + SoR

☒ Show total

Visible categories:

☒ Indicado
☒ Inferido
☒ Medido
☐ No Clasificado

Title:
Veta Mercedes

Cut-off:
<None>
0.00
☐ Report below (<) cut-off

Filter:
<None>

Click on the columns below to edit them, or click and drag to reorder.

Class KE + SoR	Mass	Average Value	Material Content
		KO, Au M	KO, Au M
	t	g/t	t. oz
Indicado	10,957.80	15.12	5,327.23
Inferido	34,193.60	15.73	17,298.07
Medido	8,589.16	13.85	3,824.67
Total	53,740.56	15.31	26,449.98

Figura 27. Reporte de recursos minerales de la veta Mercedes.

85

La figura presenta el resultado del reporte de recursos minerales para la Veta Mercedes, donde se aplicó la clasificación basada en los parámetros combinados Kriging Efficiency (KE) y Slope of Regression (SoR). El reporte detalla el tonelaje (Tm), el valor promedio de ley (Gr/Tn) y el contenido metálico estimado (Onzas troy) para cada categoría de confianza del recurso: indicado, medido e inferido

Se utilizó una densidad constante de 2.6 g/cm³ para la conversión de volumen a tonelaje. Además, se habilitó la visualización del contenido metálico con el fin de cuantificar la estimación de oro asociada a cada categoría. Los resultados muestran un total estimado de 53 740.56 Tm, con una ley promedio global de 15.31 Gr/Tn, que corresponde a un contenido metálico total aproximado de 26 449.98 oz t.

Este reporte constituye la síntesis de la clasificación final del modelo de bloques, permitiendo evaluar la distribución del recurso en función del nivel de confianza geológico.

Tabla 6. Clasificación de recursos minerales de la veta Mercedes.

VETA MERCEDES			
RECURSO	Masa	Ley promedio	Material contenido
	t	g/t	t. oz
Indicado	10957.8	15.12	5327.23
Inferido	34,193.60	15.73	17298.07
Medido	8,589.16	13.85	3824.67
Total	53,740.56	15.31	26449.98

Tabla 7. Resumen de la clasificación de los recursos minerales, para las Vetas Victoria, Victoria Techo y Veta Mercedes

Veta	Categoría de recurso	Masa (t)	Ley promedio (g/t Au)	Contenido metálico (oz Au)
Veta Victoria	Medido	1616.43	2.54	131.79
	Indicado	653.32	2.35	49.33
	Inferido	8772.06	2.58	728.32
	SubTotal	11041.81	2.56	909.44
Veta Victoria Techo	Medido	6725.21	3.71	802.27
	Indicado	9328.26	3.26	977.43
	Inferido	34756.14	2.92	3261.75
	SubTotal	50809.61	3.09	5041.45
Veta Mercedes	Medido	8589.16	13.85	3824.67
	Indicado	10957.8	15.12	5327.23
	Inferido	34193.6	15.73	17298.07
	SubTotal	53740.56	15.31	26449.98
TOTAL		115591.98	8.72	32400.87

4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La hipótesis planteada en la tesis sostiene que el modelamiento geológico basado en información estructural, litológica, mineralógica y de alteración permite determinar con aproximación los recursos minerales presentes en las vetas Victoria, Victoria Techo y Mercedes. Esta afirmación se encuentra respaldada por diversos antecedentes:

- Leach et al. (2003) confirman la utilidad del modelamiento 3D en depósitos epitermales para estimar recursos de manera confiable. Si bien el yacimiento de Puyhuan es de tipo orogénico, los principios de integración de datos geológicos son válidos y aplicables, por lo que el enfoque es concordante.
- Chacón Mendoza (2017) validó el uso de modelos de bloques y kriging para vetas auríferas en La Libertad, encontrando que los controles estructurales y litológicos son determinantes, lo cual concuerda plenamente con el caso de estudio de esta tesis, donde se identificó una fuerte influencia estructural.
- Obregón Castillo (2019) en el mismo distrito minero, aplicó metodologías similares para vetas del sector San Juan, concluyendo que el modelamiento geológico mejora la precisión en la estimación de recursos. Esto respalda directamente la hipótesis central de esta investigación.

En síntesis, los antecedentes nacionales e internacionales apoyan la validez de la hipótesis, demostrando que el modelamiento geológico estructurado permite una estimación fiable y técnicamente sustentada de recursos minerales del yacimiento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El modelo geológico tridimensional de las vetas Victoria, Victoria Techo y Mercedes mediante el análisis de datos geológicos integrados en Leapfrog Geo. Este modelo define con aproximación la geometría y continuidad de los cuerpos mineralizados. El modelo sirvió como base para interpolar leyes de oro y estimar recursos minerales, cumpliendo el objetivo de sustentar la planificación y toma de decisiones

El mapeo litológico detallado entre los niveles 2870 y 3300 m.s.n.m., documentando litología, estructuras y zonas de alteración hidrotermal, permitieron comprender el contexto geológico y establecer los controles de mineralización, lo cual sirvió para realizar el modelo tridimensional.

Se integraron datos litológicos y mineralógicos en Leapfrog Geo para construir sólidos y superficies que representen unidades litológicas, vetas y zonas de alteración. El modelo define la geometría y continuidad de las vetas, y fue validado con datos de campo y secciones geológicas.

Se aplicó el método de kriging al modelo de bloques 3D para estimar leyes de oro y tonelaje, obteniendo 115,591.98 toneladas con leyes entre 2.56 y 15.31 g/t Au. Los recursos se clasificaron como Medidos, Indicados e Inferidos según el Código JORC, permitiendo una evaluación más realista del potencial económico del yacimiento y respaldando la continuidad de los trabajos de exploración y desarrollo.

5.2 RECOMENDACIONES

Actualizar el modelo geológico en la zona de Puyhuan periódicamente, integrando nuevas campañas de exploración que permitan mejorar la clasificación de recursos inferidos a indicados o medidos.

Se recomienda la implementación de un sistema de control de calidad de los datos geoquímicos y topográficos, que asegure la consistencia y precisión de la información utilizada en los procesos de estimación de recursos, contribuyendo a la reducción de incertidumbres y al aumento de la confianza en los resultados obtenidos.

Se recomienda la ejecución de una campaña de perforación diamantina orientada a la validación de los contactos del modelo litológico propuesto. Este método permitirá la obtención de testigos continuos de alta calidad, facilitando la observación directa de las relaciones litológicas, la confirmación de la geometría de las unidades y la reducción de las incertidumbres asociadas a la interpretación del modelo geológico.

Se recomienda realizar un cartografiado geológico detallado y una interpretación estructural a escala regional de las estructuras mineralizadas presentes en la zona de investigación, con el objetivo de mejorar la comprensión de su geometría, continuidad y controles estructurales, lo que permitirá optimizar la construcción y confiabilidad del modelo tridimensional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, M. 2007. Estimación de recursos minerales. París.
- Alva, K. 2019. Modelamiento geológico para el cálculo de recursos mineros de la veta Murciélagos de la mina Paredones, Chilete 2018. Cajamarca.
- Cabanillas, M. 2008. Formulación de un modelo geológico-estructural en el sistema de vetas de la franja oeste del yacimiento minero de Parcoy, Consorcio Minero Horizonte. Lima.
- Cabello, O. 2017. Modelamiento geológico y estimación de recursos, yacimiento La Niña, Tongoy, Cementos Melón S.A. Santiago de Chile.
- Castro, F. 2010. Controles de la mineralización aurífera en las vetas del yacimiento de Consorcio Minero Horizonte, del batolito de Pataz. Lima.
- Chacón, J. 2017. Estimación de recursos minerales de las vetas La Lechera y La Negrita, Unidad Minera Santa Rosa – La Libertad. Trujillo, PE, Repositorio Institucional de la UNT.
- Coba, R. 2017. Modelo geométrico y características estructurales del sistema de vetas de alto ángulo al norte del batolito de Pataz, mina Poderosa, La Libertad – Perú. Cajamarca.
- Código JORC. 2001. Código de Australasia para informar sobre recursos minerales y reservas de mena.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. 2018. Estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales (ECRR). Colombia.
- Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO). 2012. Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves. Australia.
- Danilo, E. 2018. Estimación de recursos minerales en la mina Santa Fe Buenavista Alta – Casma – Áncash. Cerro de Pasco.
- Espinoza, M. 2018. Estimación de recursos minerales en la mina Santa Fe Buenavista Alta. Pasco.
- Evans, A. 2009. Ore geology and industrial minerals: An introduction. Oxford, UK, Wiley-Blackwell.
- Furtado, A. 2014. Modelamiento geológico en 3D del depósito aurífero de tipo orogénico Argentinita, ubicado dentro del distrito minero Zapucay, Rivera. Montevideo.

- Gonzales, R. 2020. Modelamiento geológico y estimación de recursos minerales de la veta Rayo en la unidad minera Yauliyacu, Empresa Minera Los Quenuales. Arequipa.
- Granda, C. 2018. Estudio geológico del yacimiento de la Unidad Minera Parcoy N.º 1. Parcoy.
- Greys, V; César, B. 2020. Evaluación geológica para el cálculo de reservas y estimación de recursos minerales del prospecto minero Chaupiloma 2007. Huancayo.
- Groves, D. 2019. Orogenic gold deposits: Part of a global dynamic conjunction between subduction and gold. ASEG Extended Abstracts.
- Guzmán, F. 2012. Manual de yacimientos minerales. Madrid, ES, UD Proyectos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Hernández, H. 2022. Introducción al modelamiento geológico implícito. Nube Minera. Disponible en: <https://nubeminera.cl/modelamiento-implicito/>
- Herrera, C; Jorge, J. 2019. Estimación de reservas mineras utilizando software comercial y software libre en la Compañía Minera Volcan S.A.A. – Unidad Cerro de Pasco. Huancavelica.
- INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico). 1995. Geología del Perú. Boletín N.º 55, Serie A. Lima, PE, Carta Geológica Nacional.
- Laubacher, G; Mégard, F. 1985. The Hercynian basement: A review. En: Pitcher, W.S., ed. Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes. London, UK, Blackie & Son.
- Leach, D; Taylor, R; Feid, D; Diehl, S. 2003. Three-dimensional modeling and resource estimation of epithermal gold-silver veins: Cerro Vanguardia deposit, Argentina. Editorial: Economic Geology.
- Mario Carpio, E. 2022. Glosario de minerales industriales y su potencialidad en el Perú. Lima, INGEMMET.
- Obregón Castillo, C. 2019. Evaluación y modelamiento geológico de las vetas del sector San Juan, Unidad Minera Consorcio Minero Horizonte – Parcoy. Lima, Repositorio Institucional de la UNI.
- Oyarzún, R. 2011. Introducción a la geología de minas, exploración y evaluación. Madrid, Peters, W. 2011. Exploration and mining geology. Berlin, Editorial: Springer.
- Rossi, M; Deutsch, C. 2014. Mineral resource estimation. Dordrecht, Editorial: Springer.
- Ruiz, Y. 2010. Aplicación de software libre para la estimación de recursos y para la evaluación técnica económica de las reservas minerales. Piura.

- Sánchez, J. 2018. Análisis de factores que influyen en la estimación de reservas probadas y probables en la Unidad Operativa Pallancata. Huancayo.
- Vilca, A. 2007. Evaluación y clasificación de recursos minerales en la veta Milagros de la mina Parcoy, provincia de Pataz, departamento de La Libertad. Lima.
- Vilca, Y. 2018. Estimación de recursos y reservas del yacimiento aurífero Fidami, Sancos – Lucanas – Ayacucho. Puno.
- Wilson, J; Reyes, L. 1964. Geología del cuadrángulo de Pataz. Lima, Comisión de la Carta Geológica Nacional.

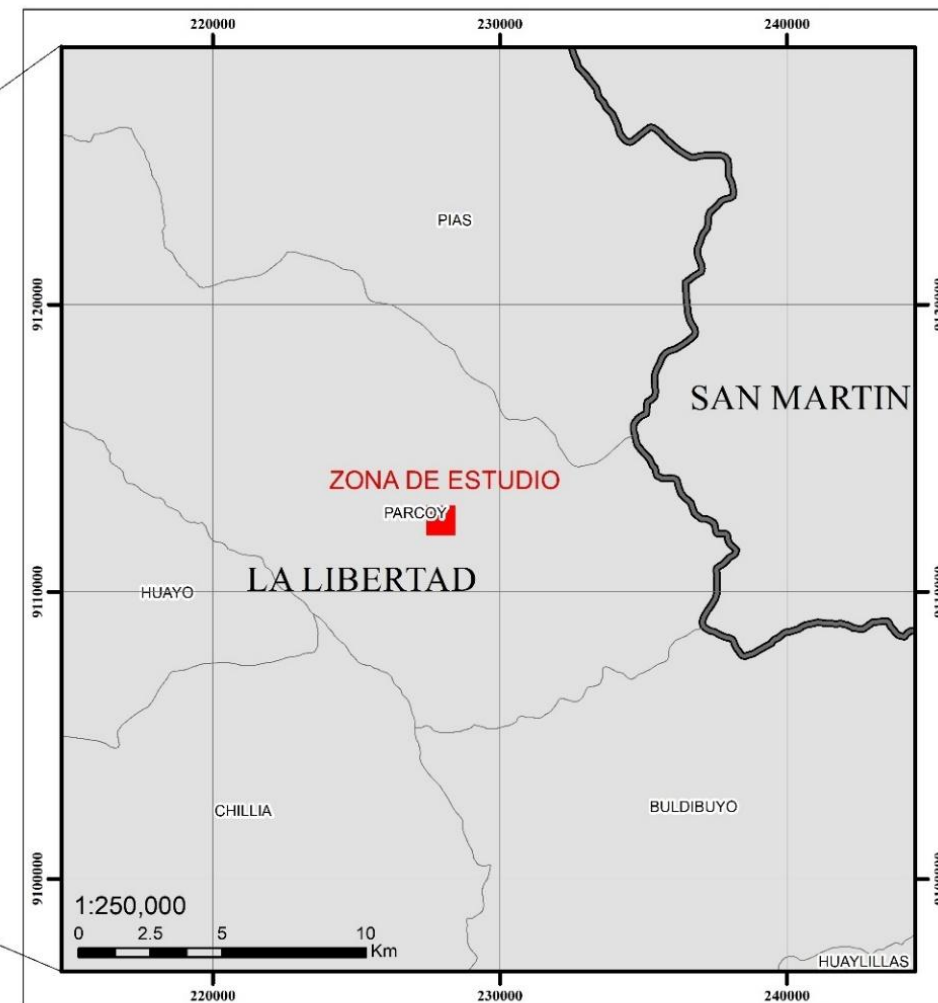
ANEXO 01:

Plano 01. Plano De Ubicación

Plano 02. Plano Litológico

Plano 03. Plano Metalogenético

Plano 04. Plano Geoquímico



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

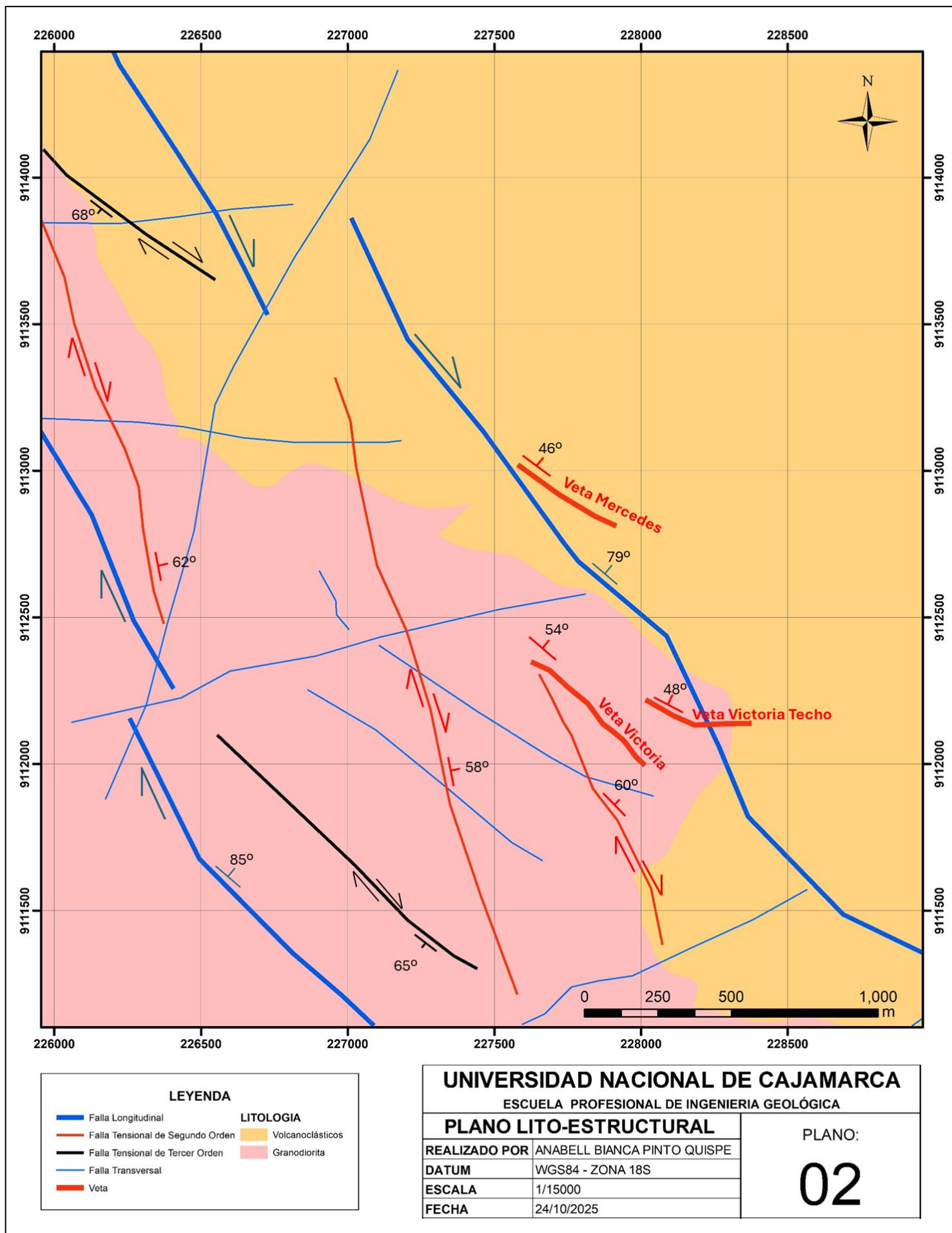
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

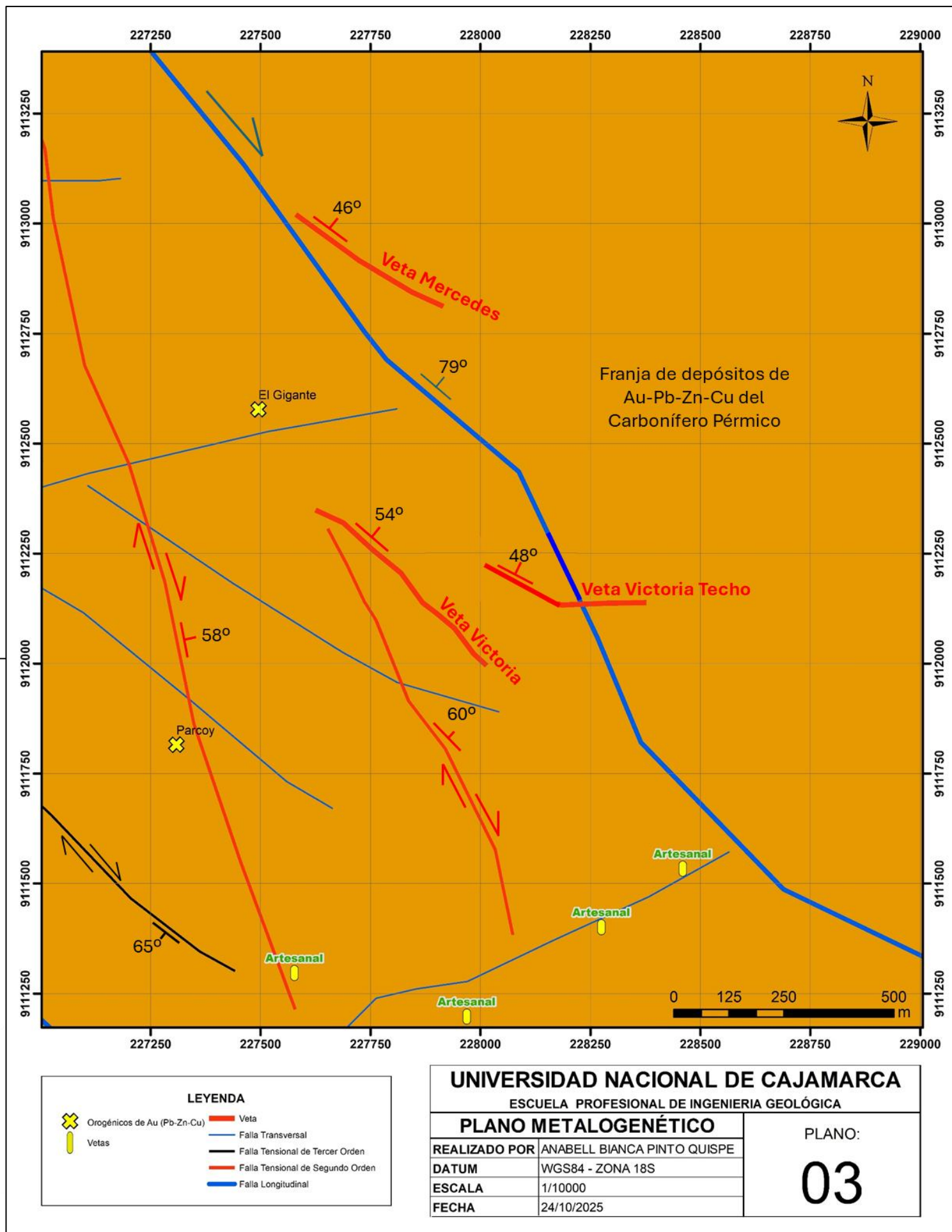
PLANO DE UBICACIÓN

REALIZADO POR	ANABELL BIANCA PINTO QUISPE
DATUM	WGS84 - ZONA 18S
ESCALA	INDICADA
FECHA	24/10/2025

PLANO:

01



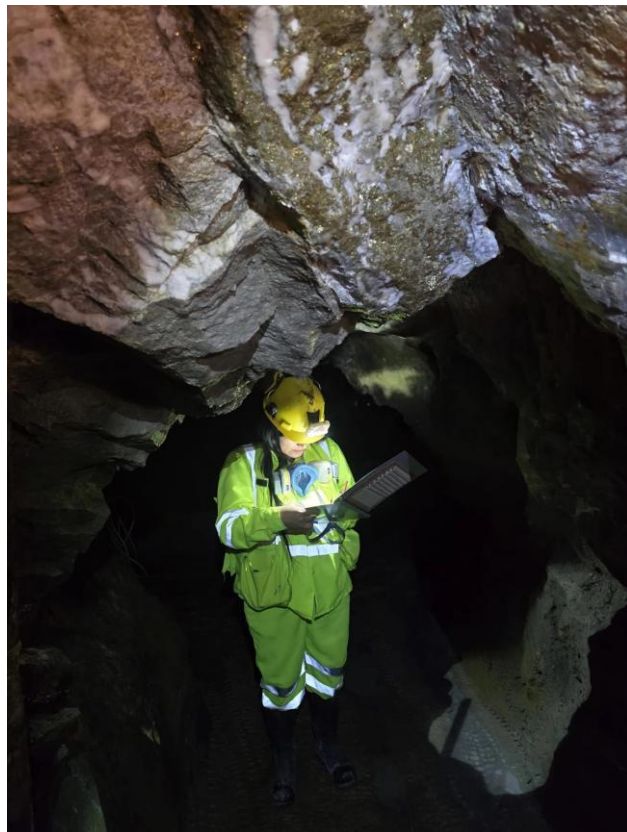


ANEXO 2: PANEL FOTOGRÁFICO

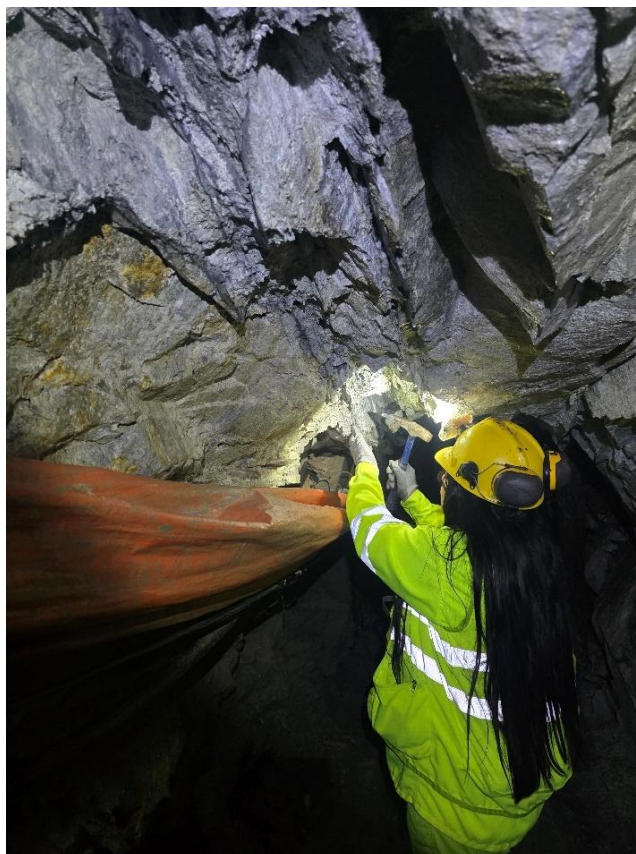


Fotografía 7. Levantamiento topográfico de labores en la zona de Puyhuan desde la cota 2780 m.s.n.m. hasta los 3300 m.s.n.m.

Fotografía 8. Cartografiado geológico en el Nivel 2900 de Puyhuan



***Fotografía 9. Muestreo y
caracterización mineralógica en el
Nivel 3100 de Puyhuan***



***Fotografía 10. Cartografiado
geológico en el Nivel 3100 de
Puyhuan.***

ANEXO 3: AUTORIZACIÓN DE USO DE INFORMACIÓN

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Retamas, 16 de julio del 2023

Por el presente documento, yo Omar Alejandro Caruanambo Rudas, identificado con DNI N° 46107266, en mi calidad de jefe del área de Desarrollo Geológico y Control de la empresa Consorcio Minero Horizonte S. A, autorizo a la Srta. Pinto Quispe Anabell Bianca, bachiller en Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional de Cajamarca, a utilizar el nombre e información confidencial de la empresa, para el desarrollo de su Tesis de Pregrado.

La empresa, precisa que toda la información proporcionada será para uso exclusivamente académico, caso contrario, el bachiller quedará sujeto a la responsabilidad civil por daños y prejuicios que cause, así como, a las sanciones de carácter penal o legal que hubiere lugar.

CONSORCIO MINERO HORIZONTE S.R.L.

Ing. Omar Caruanambo Rudas
Jefe de Desarrollo Geológico y Control
N° CIP : 215588

Omar Alejandro Caruanambo Rudas
DNI N° 46107266
Jefe de Desarrollo Geológico y Control