



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Controles estructurales y estratigráficos de la mineralización en las Minas San Cristóbal - Carahuacra, Yauli - Junín

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
mención en Tectónica y Geología Regional

AUTOR

Segundo Reynaldo CARRASCO VIZA

ASESOR

Mg. Guillermo Nicanor DÍAZ HUAINA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

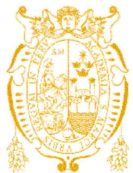
Referencia bibliográfica

Carrasco, S. (2026). *Controles estructurales y estratigráficos de la mineralización en las Minas San Cristóbal - Carahuacra, Yauli - Junín*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Segundo Reynaldo Carrasco Viza.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	30962297
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0007-5314-1287
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Guillermo Nicanor Díaz Huaina
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	7426765
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9005-3605
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Guadalupe Gómez Enrique
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	9191995
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Aramburú Rojas Sixto Vidal
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	8608364
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Uribe Córdova Víctor Manuel
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40534269
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Juan Carlos Montero Chirito
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	9493599

Datos de investigación	
Líneas de investigación	C.16.0.7 - Recursos mineros C.16.0.9 - Geodinámica externa e interna
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: EL QUBO, Av. Manuel Olguín 375, Urbanización Los Granados, Santiago de Surco. País: Perú Departamento: Junin Provincia: Yauli Distrito: Yauli Urbanización: No aplica Latitud: -11.742305 Longitud: -76.056590
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025-2026
URL de disciplinas OCDE	Geología: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geociencias, Multidisciplinar: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los cuatro días del mes de mayo del año dos mil veintiséis, siendo las diez horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000244-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 29 de abril del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«CONTROLES ESTRUCTURALES Y ESTRATIGRÁFICOS DE LA MINERALIZACIÓN EN LAS MINAS SAN CRISTÓBAL - CARAHUACRA, YAULI - JUNÍN»

Presentado por el Bach. **SEGUNDO REYNALDO CARRASCO VIZA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **TECTÓNICA Y GEOLOGIA REGIONAL**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20240062665, de fecha 26 de junio del 2024, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 01153-CR-00 del 02 de febrero del 2000.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 66 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

----- *BUENO (16)* -----

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **TECTÓNICA Y GEOLOGIA REGIONAL** al Bach. **SEGUNDO REYNALDO CARRASCO VIZA**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. ENRIQUE GUADALUPE GÓMEZ
Presidente

DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Secretario

MG. VÍCTOR MANUEL URIBE CÓRDOVA
Miembro

DR. JUAN CARLOS MONTERO CHIRITO
Miembro

MG. GUILLERMO NICANOR DÍAZ HUAINA
Asesor



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, MG. GUILLERMO NICANOR DIAZ HUAINA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000020-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «**CONTROLES ESTRUCTURALES Y ESTRATIGRÁFICOS DE LA MINERALIZACIÓN EN LAS MINAS SAN CRISTÓBAL - CARAHUACRA, YAULI - JUNÍN**», presentado por el **bachiller** SEGUNDO REYNALDO CARRASCO VIZA para optar el grado académico de MAGISTER EN GEOLOGIA CON MENCIÓN EN TECTÓNICA Y GEOLOGIA REGIONAL, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **11%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de MAGISTER EN GEOLOGIA CON MENCIÓN EN TECTÓNICA Y GEOLOGIA REGIONAL.

Lima, 5 de Julio de 2026

Firma del Asesor: 

Nombres y Apellidos del asesor: Guillermo Nicanor Diaz Huaina

DNI: 07426765

** Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad
La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.*

DEDICATORIA

A mis padres, Segundo Carrasco y Haydee Viza, por ser mi guía, mi fortaleza y mi mayor inspiración. Su amor, esfuerzo y enseñanzas me han impulsado a ser cada día mejor y lograr todos mis objetivos.

A mis hijos, José Carlos y Fiorella, mi mayor tesoro, mi fuente inagotable de alegría y motivación. Que este logro sea un ejemplo, que con dedicación y perseverancia todo es posible.

A ustedes, les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud eterna.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la **Compañía Minera Volcán**, por la confianza depositada al permitirme utilizar sus datos y acceder a información valiosa para el desarrollo de esta tesis. Su colaboración ha sido fundamental para lograr este trabajo.

A mi asesor, el **Ing. Guillermo Díaz**, por su paciencia, guía y valiosos consejos durante todo este proceso. Su experiencia y constante apoyo han sido clave para alcanzar este importante logro académico.

Al **Ing. Orlando de la Cruz**, por su disposición, tiempo y apoyo incondicional en los momentos más críticos del desarrollo de esta investigación. Sus aportes técnicos y profesionales fueron de gran ayuda para consolidar este proyecto.

A los docentes **Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas** y al **Mg. Víctor Manuel Uribe Córdova**, mi profundo agradecimiento por sus valiosas correcciones, sugerencias y observaciones finales, que contribuyeron significativamente a la mejora y calidad de esta tesis. Su compromiso académico, rigurosidad y generosa disposición para orientar este trabajo han sido fundamentales para su culminación exitosa.

A todas las personas que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de esta tesis, ya sea brindando su tiempo, conocimientos o palabras de aliento. A cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo y la colaboración de todos ustedes.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TABLAS.....	vii
FIGURAS	ix
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	1
1.3. Justificación de la Investigación.....	2
1.4. Objetivos de la investigación	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Hipótesis general	4
1.6. Hipótesis específica	5
1.7. Identificación de variables.....	6
1.7.1. Variables independientes y dependientes	6
1.7.2. Operacionalización de variables	6
1.8. Matriz de consistencia	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes del Problema	9
2.2. Bases Teóricas.....	11
2.2.1. Tectónica cenozoica en el postarco peruano	11
2.2.2. Geometría de estructuras tectónicas	17
2.2.3. Cinemáticas de los sistemas de fallas	18
2.2.4. Origen de los fluidos mineralizantes	19

2.2.5. Interacción de la salida de los fluidos mineralizantes	23
2.2.6. Método de los Diedros Rectos.....	26
2.2.7. Diagramas de Rosetas	27
2.2.8. Modelamiento estructural 2D y 3D	28
2.2.9. Domo de Yauli.	30
2.2.10. Principales características de los yacimientos cordilleranos de metales base.	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	33
3.1. Tipo y Diseño de Investigación	33
3.1.1. Tipo de Investigación	33
3.1.2. Diseño de Investigación.....	33
3.2. Unidad de análisis.....	34
3.2.1. Estudio a nivel Regional:	34
3.2.2. Estudio a nivel Local:.....	34
3.2.3. Estudio a nivel análisis de laboratorio:.....	35
3.3. Población	35
3.4. Tamaño de muestra	36
3.5. Selección de muestras.....	36
3.6. Técnicas de recolección de Datos	37
3.6.1. Observación de la recolección de datos	37
3.7. Análisis e interpretación de la información.....	39
CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA	40
4.1. Ubicación del área de estudio.....	40
4.2. Geología Regional	41
4.2.1. Grupo Excélsior	41
4.2.2. Grupo Mitu.....	45
4.2.3. Grupo Pucará	50

4.2.4. Unidades Cretáceas	53
4.2.5. Rocas Intrusivas	54
CAPÍTULO V: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	59
5.1. Características estructurales de las vetas	60
5.2. Eventos estructurales mineralizantes	65
5.2.1. Primer evento estructural.....	66
5.2.2. Segundo evento estructural.....	67
5.2.3. Tercer evento estructural	69
5.2.4. Cuarto evento estructural	76
5.3. Reología en las rocas portadoras de vetas polimetálicas	80
5.3.1. Reología del Grupo Excélsior	81
5.3.2. Reología del Grupo Mitu	82
5.3.3. Reología del Grupo Pucará	83
5.4. Aplicación práctica de la Reología en los sistemas vetiformes	84
5.5. Análisis de paleoesfuerzos.	86
5.6. Oportunidades de nuevos targets de exploración.....	86
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y	
RECOMENDACIONES	89
6.1. DISCUSIÓN	89
6.2. CONCLUSIONES.	90
6.3. RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
GLOSARIO	98
7.1. Plunge.....	98
7.2. Pitch.....	98
7.3. Cinemáticas de fallas.....	99

7.4.	Ore shoot	99
7.5.	Diagrama de diedros	99
7.6.	Fallas de rumbo	101
7.7.	Cuerpos de reemplazamiento.	102
7.8.	Rocas subvolcánicas.	102
7.9.	Boudinage.....	102
7.10.	Reología.	102
7.11.	Dirección de movimiento de una falla.	103
ANEXOS		105

TABLAS

Tabla 1. <i>Problema Causas y Efecto</i>	3
Tabla 2. <i>Justificación teórica, práctica, metódica y social</i>	4
Tabla 3. <i>Variables independientes y dependientes</i>	6
Tabla 4. <i>Operacionalización de variables</i>	7
Tabla 5. <i>Matriz de consistencia.</i>	8
Tabla 6. <i>Composición promedio (análisis por FRX-roca total) de las formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga en las columnas estudiadas en el centro de Perú, modificado de (Rosas y Fontboté, 1994).</i>	53
Tabla 7. <i>Características de RQD, RMR y Calidad de Roca para las diferentes unidades.</i>	85

FIGURAS

- Figura 1.** Geometría del ascenso magmático en arcos con distintos regímenes. Tomado de (Rhys et al., 2020). Nota: Arco en extensión B) Arc en compresión C) Arco en convergencia oblicua. 15
- Figura 2.** Este mapa ilustra las direcciones y las velocidades del movimiento de las placas en centímetros al año. Modificado de (Tarbuck y Lutgens, 2010). 16
- Figura 3.** Vectores de convergencia de placas tuvieron direcciones NE-SO y O-E durante el Cenozoico. Modificado de (Pardo-Casas y Molnar, 1987). 17
- Figura 4.** Clasificación de fallas basada en el buzamiento y cabeceo. Modificado de (Angelier, 1994). 20
- Figura 5.** Vetas cordilleranas de metales base y cuerpos de remplazamiento. Modificado de (Bendezu et al., 2003; Muntean y Einaudi, 2001). 21
- Figura 6.** Modelo conceptual de depósitos cordilleranos V1 cuerpos V2 vetas. (R. Bendezu, comunicación personal, 26 de mayo de 2023). 22
- Figura 7.** Zonamiento de la mineralización en vetas cordilleranas de metales base, con sus respectivos estadios. (R. Bendezu, comunicación personal, 26 de mayo de 2023). 23
- Figura 8.** Geometría de un codo dilatacional en relación con la dirección de desplazamiento de la falla. El desarrollo de ejes intermedios (Sigma 2) permite una buena conectividad vertical en fallas transcurrentes, por ende, el fácil ascenso de fluidos. Modificado de (Cox et al., 2001). 24
- Figura 9.** Representación esquemática del mecanismo de bomba de succión. Modificado de (Sibson, 1987). 25
- Figura 10.** Método de los diedros rectos. 27
- Figura 11.** Diagrama de rosetas para el segundo, tercero y cuarto evento estructural. 28
- Figura 12.** Modelamiento 3D de las minas San Cristóbal - Carahuacra con mineralización correspondiente a los diferentes eventos estructurales. 30
- Figura 13.** Plano geológico del domo de Yauli con los diferentes yacimientos y proyectos que alberga el domo de Yauli. Plano base (Salazar Díaz, 1983),

<i>con las principales estructuras, nombres de fallas según (Lepry, 1981).</i>	31
Figura 14. <i>Plano de ubicación y acceso a las minas San Cristóbal - Carahuacra.</i>	40
Figura 15. <i>Unidades litoestratigráficas presentes en San Cristóbal – Carahuacra.</i>	44
Figura 16. <i>Esquisto de cuarzo – sericita</i>	45
Figura 17. <i>Microfotografía, Textura granolepidoblástica compuesta por blastos de cuarzo I (cz I), presente en intercalaciones de bandas de cuarzo II (cz II) y bandas de sericita (ser). Presencia de minerales opacos (OPs). Fotomicrografía en LT-NX.</i>	46
Figura 18. <i>Columna estratigráfica de San Cristóbal y Carahuacra.</i>	47
Figura 19. <i>Tajo Gavilán lugar donde se realizó la columna estratigráfica.</i>	53
Figura 20: <i>Columna Estratigráfica del Grupo Pucara.</i>	55
Figura 21. <i>Subvolcánico Carahuacra cortando secuencias metamórficas del Grupo Excelsior.</i>	57
Figura 22. <i>Intrusivos subvolcánicos pórfido dacítico</i>	57
Figura 23. <i>Microfotografía, textura porfirítica, compuesta por fenocristales de feldespatos I (FPs I) soportados en una matriz de cuarzo II-feldespatos II (cz II-FPs II) alteados por carbonatos I-sericita-illita-esmectitas (CBs I-ser-ill-esm). Fotomicrografía en LT-NX.</i>	58
Figura 24. <i>Correcta planificación de Sondajes y/o labor minera con la finalidad de encontrar nuevos recursos a partir evidencias de mineralización en superficie y teniendo en cuenta indicadores cinemáticos. Modificado de (Nelson, 2006).</i>	62
Figura 25. <i>Plano estructural Nivel. 820 San Cristóbal – Carahuacra.</i>	63
Figura 26. <i>Plano Geológico mostrando cuatro eventos estructurales.</i>	67
Figura 27. <i>Sección transversal, mostrando fallamiento inverso y normal ocurrido en el primer evento estructural, estas fallas tienen una dirección NW-SE buzando al SW, flanco Este del anticlinal de Chumpe, zona de Huaripampa.</i>	68

- Figura 28.** Segundo Evento Estructural. A.- Diagrama de polos, contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.....69
- Figura 29.** Fallas correspondientes al segundo y cuarto evento estructural, aquí se muestra además de las secuencias de eventos, su relación con la lito-estratigrafía. 70
- Figura 30.** Modelo de bloques V.K. mostrando zonas de apertura y cierre, en esta estructura se puede apreciar zonas de apertura y cierre, también muestra el minado y sondajes realizados. 71
- Figura 31.** Tercer Evento Estructural. A.- Diagrama de polos y contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.....71
- Figura 32.** Veta Split 658, modelo de bloques representando el tercer evento estructural.....72
- Figura 33.** Veta San Cristobalito, correspondiente al tercer evento estructural, cinemática dextral – normal, plunge 45° al Este. 73
- Figura 34.** Veta San Cristobalito, correspondiente al tercer evento estructural, presenta una cinemática dextral – normal. A) Vista al suroeste, Veta San Cristobalito mostrando trayectoria en campo, B) Vista al suroeste, estructura tipo R en Veta San Cristobalito que ayuda a determinar su cinemática de movimiento C) Vista al noroeste, estaría mostrando una cinemática dextral normal con pich de 40°.....74
- Figura 35.** Veta San Cristobalito correspondiente al tercer evento estructural, la veta en mención tiene un recorrido de más 3 km con ore shoots de 300 a 500 metros y zonas de cierre de la misma dimensión. 75
- Figura 36.** Veta ML mostrando leyes de Zn con su correspondiente posición del ore shoot, al llegar al horizonte permeable que lo constituye la Formación Chambará da lugar a la formación de mantos, cambiando la dirección de fluidos mineralizantes, este cambio está también condicionado por la Formación Aramachay que actúa como sello debido a su alto contenido de sílice. 76
- Figura 37.** Salto de falla San Cristobalito en Tajo Oyama.....77

Figura 38. Cuarto Evento Estructural. A.- Diagrama de polos y contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.....	78
Figura 39. Veta 722, modelo de bloques mostrando zinc equivalente con la posición del ore shoot correspondiente al cuarto evento estructural.	78
Figura 40. Veta 658, modelo de bloques mostrando la intersección de dos sistemas estructurales ambos mineralizados y con distintos ore shoots.	80
Figura 41. Tendencia de los fracturamientos del Grupo Excelsior.	81
Figura 42. Tendencia de los fracturamientos del Grupo Mitu.	82
Figura 43. Tendencia de los fracturamientos del Grupo Pucará.	83
Figura 44. Análisis de paleo esfuerzos en el software Win Tensor, con todos datos estructurales del segundo, tercer y cuarto Evento A) Análisis PBT, B) Diagrama de Rosetas y C) Ángulos de buzamiento de toda la población de datos.....	86
Figura 45. Planta cota 4100, oportunidad de encontrar feeders alimentadores de los mantos Lidia, galáctico y 423.....	87
Figura 46. Sección longitudinal mostrando la ubicación de ore shoot inexplorados.	88
Figura 47. Rumbo, buzamiento, pich y plunge de una falla.	98
Figura 48. Posición de los diferentes ore shoots de acuerdo con el tipo de falla, modificado de (Cox, 2020).	100
Figura 49. Principales estructuraras asociadas a una zona de falla de rumbo (en este caso dextral), indicando los sectores favorables y desfavorables para albergar cuerpos minerales, modificado de (Lillo y Oyarzun, 2013). ...	101
Figura 50. Indicadores cinemáticos en fallas de acuerdo con criterios de (Petit, 1987).	104

ANEXOS

Anexo 1: Datos de los distintos eventos estructurales (Datum PSAD56).	106
Anexo 2: Principales características de las vetas, mantos y cuerpos de las minas San Cristóbal-Carahuacra.	108
Anexo 3: Petrografía de las minas San Cristobal - Carahuacra.	110
Anexo 4: Plano geológico y sección de San Cristóbal – Carahuacra.	126

RESUMEN

Los sistemas vetiformes de San Cristóbal - Carahuacra, están ubicados en la parte suroeste del distrito y provincia de Yauli, en la Región Junín. La estratigrafía está supeditada a secuencias de los periodos Devónico al Jurásico, presentando un predominio litológico de rocas metamórficas, volcaniclásticas y sedimentarias, que hospedan a los sistemas estructurales secundarios del tipo vetas polimetálicas y mantos del tipo cordillerano. El área presenta un basamento metamórfico pasando a secuencias continentales para culminar en secuencias marinas. La investigación está supeditada al comportamiento de las diferentes secuencias estratigráficas con respecto a la interacción rocas versus control de fracturamiento en las diversas litologías que han controlado el desarrollo de los sistemas de fractura por donde se emplazan los diversos tipos de vetas mineralizadas por metales base en la zona.

Los eventos asociados a la geología estructural en San Cristóbal - Carahuacra, revela una compleja historia de deformación y mineralización, caracterizada por múltiples eventos estructurales que controlaron la formación de vetas polimetálicas. La diferenciación de los controles estratigráficos y estilos estructurales en rocas metamórficas, volcaniclásticas y sedimentarias, que establecen una cronología precisa de los eventos mineralizantes. El primer Evento Estructural es del tipo sistema Andino, el segundo Evento Estructural corresponde al tipo Antiandino caracterizado por una cinemática dextral normal, el tercer evento estructural se sitúa con dirección "NNE" y una cinemática dextral normal, por último, el cuarto evento estructural presenta una dirección sublatitudinal y tiene una orientación "ENE" con cinemática sinistral normal. Las implicaciones geológicas determinan la diversidad de estilos o controles estructurales, y reflejan la complejidad de la historia tectónica andina de la región. Además, la cronología de eventos permite comprender la evolución de los fluidos hidrotermales y consecuentemente la formación de los depósitos minerales. Lo cual determina un análisis fundamental en la geología económica del yacimiento San Cristóbal – Carahuacra.

Para complementar la presente tesis, se ha desarrollado un capítulo denominado “Reología”. La reología ha permitido analizar la deformación de las diversas unidades estratigráficas y litodémicas en la zona, controlando el fracturamiento y su posterior mineralización. Es crucial para entender cómo las rocas responden a las tensiones y deformaciones durante la formación de la mineralización. Los sistemas de vetas polimetálicas, formados por procesos hidrotermales, se emplazan en diversas litologías, cada una con características reológicas únicas que controlan el fracturamiento y la mineralización. La comprensión de la reología en rocas portadoras de vetas es esencial para la exploración y explotación de depósitos polimetálicos. El análisis de la deformación y el fracturamiento permite predecir la geometría y la distribución de las vetas. La caracterización de las propiedades reológicas de las rocas es crucial para la estabilidad de las excavaciones mineras.

Palabras clave: San Cristóbal - Carahuacra, geología estructural, rocas metamórficas, volcaniclásticas y sedimentarias, vetas polimetálicas, eventos estructurales, mineralización, reología, hidrotermalismo, geología económica.

ABSTRACT

The vetiform systems of San Cristobal - Carahuacra are located in the southwest part of the district and province of Yauli in the Junín region. The stratigraphy is subjected to sequences of the devonic to Jurassic periods, presenting a lithologic majority of metamorphic, volcanoclastics, and sedimentary rocks, that host the secondary structural systems of the polymetallic vein type and mountain range type layers. The area presents a metamorphic base moving onto continental sequences to end in sea sequences. The study is subjected to the behavior of the different stratigraphic sequences regarding the rock versus fracking control in the diverse lithologies that have controlled the development of the fracking systems where the different type of mineralized veins in the zone are located.

The mineralizing structural events at San Cristobal - Carahuacra reveal a complex history of deformation and mineralization, characterized by multiple structural events that controlled the formation of polymetallic veins. The differentiation of structural styles in metamorphic, volcanoclastic and sedimentary rocks allows establishing a precise chronology of the mineralizing events. The first Structural Event is of the Andean system type, the second Structural Event corresponds to the Anti-Andean type characterized by a normal dextral kinematics, the third structural event is located with a “NNE” direction and a normal dextral kinematics, finally the fourth structural event presents a sublatitudinal direction and also an “ENE” orientation with normal dextral kinematics. The geological implications determine the diversity of structural styles, and reflect the complexity of the tectonic history of the region. In addition, the chronology of events allows understanding the evolution of hydrothermal systems and the formation of mineral deposits.

To complement the present thesis, a chapter called “Rheology” has been developed. Rheology has controlled the deformation of the various stratigraphic and lithodemic units in the area, controlling fracturing and subsequent mineralization. It is crucial to understanding how rocks respond to stress and deformation during vein formation. Polymetallic vein systems, formed by hydrothermal processes, are emplaced in diverse lithologies, each

with unique rheological characteristics that control fracturing and mineralization. Understanding rheology in vein-bearing rocks is essential for exploration and exploitation of polymetallic deposits. Analysis of deformation and fracturing allows prediction of vein geometry and distribution. Characterization of the rheological properties of rocks is crucial for the stability of mining excavations.

Keywords: San Cristóbal - Carahuacra, structural geology, metamorphic rocks, volcanoclastic and sedimentary rocks, polymetallic veins, structural events, mineralization, rheology, hydrothermalism, economic geology.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

El problema central que motiva esta investigación radica en la ausencia de un modelo que establezca la correlación entre los controles estructurales y estratigráficos y la mineralización polimetálica en las minas San Cristóbal – Carahuacra. Sin comprender esta relación, la exploración minera se realiza de manera empírica, generando sondajes sin corte de mineralización y pérdidas económicas para la operación. La investigación demuestra, mediante análisis cuantitativos de datos estructurales (65 mediciones de rumbo, buzamiento y pitch), que existe una correlación directa entre: (1) la orientación y cinemática de cada evento estructural y la posición de los ore shoots; (2) el tipo de litología (Grupo Excelsior, Mitu y Pucará) y el estilo de mineralización (vetas vs. mantos); y (3) la secuencia tectónica polifásica y la paragénesis mineral de los estadios A, B y C. Esta correlación constituye la base científica del nuevo modelo geológico-estructural propuesto.

1.2. Formulación del Problema

- ¿El estudio estructural y estratigráfico permitirá una mejor comprensión para determinar la presencia del mineral?

Sí, basado en estas dos ciencias se logrará tener un mejor entendimiento de donde se deposita el mineral, por ende, se le podrá encontrar más rápidamente.

- ¿Qué método van a utilizar?

Se utilizará un control cinemático de las estructuras observadas en campo para después aplicar software que nos proporcionará información de cómo se distribuyen los esfuerzo compresivos y distensivos para conocer las

áreas más prospectivas, de acuerdo con la posición de conductos mineralizantes.

- ¿Se podrá tener un aumento de las reservas?

Si, la toma de datos, el análisis y su control permitirá desarrollar en gabinete los diversos mapas e informes, donde se llegará a la conclusión de cómo es la posición de los ores shoots en las vetas y que factores condicionan el desarrollo de los mantos. Para después empezar a desarrollar las nuevas cámaras de perforación en interior mina y plataformas de perforación diamantina en superficie con la finalidad de encontrar nuevos recursos y reservas (Tabla 1).

1.3. Justificación de la Investigación

- La presente investigación se realiza para proponer un nuevo modelo estructural para las minas San Cristóbal - Carahuacra (Tabla 2).

- Se podrá tener un mayor control integral de la geología de la zona de estudio, debido a que no se tiene estudios parecidos a los desarrollados en la presente tesis. Además de argumentar el presente temario que justifique la presentación de la tesis de postgrado.

- Los estudios estructurales aplicados a las minas San Cristóbal - Carahuacra, tienen como premisa conocer en forma más detallada la parte estructural que sirva para conocer como están proyectados las estructuras lineales vetiformes en profundidad.

- Con los estudios realizados, se obtendrá los diversos parámetros que serán necesarios para realizar el modelo geológico-estructural de las minas San Cristóbal - Carahuacra.

Tabla 1. Problema Causas y Efecto

PROBLEMA	CAUSAS	EFFECTO (SOLUCION)
Se tiene que desarrollar un mapa geológico al detalle de la zona del estudio.	La continuidad de las vetas en la mina, hacían que no se desarrollen estudios estructurales.	Tener un control fiable en las continuidades laterales y en profundidad de las estructuras mineralizadas.
Se debe tener un mejor control estratigráfico	Los sistemas vetiformes están llegando a niveles profundos de producción, lo que induce a desarrollar nuevos estudios para lateralizar la mina.	Se tendrá como resultados una etapa de exploración con zonas delimitadas por los estudios estructurales.
No se tiene un estudio estructural en la zona.	No se tiene profesionales capacitados en control estructural.	Se podrá tener un mejor conocimiento de dónde colocar las diversas perforaciones diamantinas.
Se deberá utilizar software de geología estructural	No había inyección de capital para realizar estudios más profundos en la zona de estudio.	Desarrollar un modelo geológico con la información tomada en campo.
Se necesita incrementar las reservas de minerales base		Con todo lo anterior se podrá incrementar la certeza de impactos en zonas mineralizadas.
No se tiene ubicado ni controlado la propagación de las estructuras mineralizadas		

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Determinar los controles estructurales y estratigráficos relacionados a la mineralización en las minas San Cristóbal - Carahuacra.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Establecer la correlación entre los controles estructurales y estratigráficos (variables independientes) y la distribución geométrica de la mineralización polimetálica (variable dependiente), mediante análisis cuantitativos de datos de campo (pitch, plunge, rumbo, buzamiento) y procesamiento con software especializado (Stereonet, FaultKin, Win Tensor).

- Correlacionar la reología diferencial de cada unidad litoestratigráfica (Grupo Excelsior, Grupo Mitu y Grupo Pucará) con el estilo de fracturamiento y el tipo de mineralización alojada, a fin de establecer controles litológicos para la exploración mineral.

Tabla 2. Justificación teórica, práctica, metódica y social

Justificación Teórica	La identificación y caracterización de eventos polifásicos estructurales (Andino, Antiandino, NNE y sublatitudinal) y su influencia en el desarrollo de la mineralización, contribuye a la comprensión de la compleja historia tectónica de los Andes centrales del Perú.
Justificación Práctica	Con el estudio desarrollado en la mina San Cristóbal - Carahuacra, se podrá saber las continuidades de los sistemas vetiformes o encontrar nuevos sistemas que incrementen la vida útil de la mina.
Justificación Metódica	Para el desarrollo de la presente tesis, el investigador desarrollará en base a los diversos datos de campo obtenidos, un nuevo planteamiento para una exploración sustentada en base a datos cuantitativos.
Justificación Social	Se seguirá atendiendo las necesidades de las diversas comunidades que están alrededor de la mina.

1.5. Hipótesis general

- Mediante la aplicación de cinemáticas de estructuras se podrá determinar la continuidad del sistema mineralizado.

- Con la elaboración de plano litoestratigráfico y estructural, se tendrá un control de los diversos sistemas mineralizados en el área.

- Con el nuevo modelo estructural se identificarán nuevos sistemas mineralizados que incrementarán las reservas y la vida útil del yacimiento minero.

- Existe una correlación significativa entre los controles estructurales y estratigráficos (variables independientes) y la distribución y geometría de la mineralización polimetálica (variable dependiente) en las minas San Cristóbal – Carahuacra de manera que a mayor control estructural definido (pitch, plunge y posición del σ_2), mayor predictibilidad en la ubicación de los ore shoots.

- Existe una correlación directa entre el control estratigráfico (reología diferencial de los grupos Excelsior, Mitu y Pucará) y el estilo de mineralización (vetas en rocas frágiles vs. mantos de reemplazamiento en la Formación Chambará), condicionada por la presencia de la Formación Aramachay como sello impermeable.

1.6. Hipótesis específica

Determinar y analizar las estructuras en la mina San Cristóbal - Carahuacra, para entender la correlación estructural y el comportamiento de la mineralización en las formaciones o grupos litoestratigráficos.

- H1 (Correlación estructural–mineralización): La orientación N60°-70°E del segundo evento estructural (cinemática dextral normal, pitch 26°NE) se correlaciona positivamente con la posición de los ore shoots a 60° al Oeste (σ_2), como se evidencia en la Veta K de San Cristóbal.

- H2 (Correlación estratigráfica–estilo de mineralización): La permeabilidad y reactividad química de la Formación Chambará (CaO: 30-48%, MgO: 4-17%) se correlaciona directamente con la formación de mantos de reemplazamiento de Zn-Pb-Cu-Ag, mientras que la alta concentración de sílice de la Formación Aramachay (SiO₂ hasta 77%) se correlaciona con su función como sello impermeable.

•H3 (Correlación reológica–fracturamiento): El comportamiento frágil del Grupo Mitu (RQD: 30-80%, RMR: 41-65) se correlaciona con vetas bien conformadas y continuas, mientras que el comportamiento dúctil-frágil del Grupo Excelsior (filitas, RQD: 25-90%, RMR: 23-70) se correlaciona con vetas ramaledas e irregulares en espesor.

1.7. Identificación de variables

1.7.1. Variables independientes y dependientes

Tabla 3. Variables independientes y dependientes

Variables independientes	
Controles estructurales (X1)	Controles estratigráficos (X2)
Rumbo	Litología
Buzamiento	RQD (Calidad de la roca)
Pitch	RMR (Clasificación del macizo rocoso)
Plunge	Composición química
Cinemática	Propiedades reológicas

Variable dependiente (Y)
Posición de ore shoots
Potencia o grosor
Leyes (Zn, Pb, Cu, Ag)
Geometría

1.7.2. Operacionalización de variables

Para la operacionalización se trabajará con software geológico, análisis químicos y datos tomados en campo.

Tabla 4. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Dimensión	Indicadores	Metodo de medición
Mineralización	Cantidad, calidad y distribución de los minerales de interes económico		Ley de los minerales, tonelaje de mineral, tipo de mineralización, distribución espacial	Análisis químicos, muestreos geológico, chip, canal, sondajes, modelado 3D
Controles Estructurales	Características geométricas y cinemáticas de las estructuras tectónicas que controlan la mineralización	Geometría	Dirección, buzamiento, desplazamiento, longitud, espesor	Brújula, clinómetro, mediciones en campo, software de modelado geológico
		Cinemáticas	Tipo de falla normal, inversa, transcurrencias, sentido de movimiento, intensidad de deformación	Observación en campo, análisis de microestructuras, diagramas de rosetas, diagrama de polos.
Controles estratigráficos	Características litológicas y estratigráficas que influyen en la mineralización	Litología	Tipo de litología, composición mineralógica, permeabilidad	Observación en campo, análisis petrográficos, toma de datos de fracturas
		Estratigrafía	Espesor de los estratos, contacto entre unidades litológicas, orientación de los estratos	Mediciones en campo, secciones geologicas, columna estratigráfica

1.8. Matriz de consistencia

Tabla 5. Matriz de consistencia.

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	V. Independientes	Indicadores X1	Tipo
¿Existe correlación entre los controles estructurales y estratigráficos y la distribución de la mineralización polimetálica en las minas San Cristóbal – Carahuacra?	Determinar los controles estructurales y estratigráficos relacionados a la mineralización y establecer su correlación con la distribución geométrica de los sistemas de vetas y mantos polimetálicos en San Cristóbal – Carahuacra.	Existe una correlación positiva y significativa entre los cuatro eventos estructurales identificados (controles estructurales) y la reología diferencial de las unidades litoestratigráficas (controles estratigráficos) con la distribución, geometría y ley de la mineralización polimetálica en las minas San Cristóbal – Carahuacra.	X1: Controles estructurales (orientación, cinemática y secuencia de 4 eventos) X2: Controles estratigráficos (reología de Grupos Excelsior, Mitu y Pucará)	Rumbo, buzamiento, pitch, plunge, cinemática (dextral/sinistral normal), posición σ_2 , n=65 datos	Aplicada, descriptiva, explicativa y CORRELACIONAL . Diseño: No experimental, transversal, correlacional. N: 65 datos estructurales, 4 muestras petrográficas. Instrumentos: Brújula geológica, GPS, Stereonet, FaultKin, Win Tensor, ArcGIS, Leapfrog Geo. Área: Minas San Cristóbal – Carahuacra, Yauli, Junín (4700 msnm).
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Correlación X–Y verificada	Fuentes / Capítulos	Técnicas específicas
PE1: ¿Qué relación existe entre la cinemática de cada evento estructural y la posición de los ore shoots? PE2: ¿Cómo se correlaciona la reología de cada unidad litoestratigráfica con el estilo de mineralización? PE3: ¿Qué controles estratigráficos determinan la formación de mantos vs. vetas?	OE1: Analizar los sistemas estructurales y establecer su correlación con la mineralización. OE2: Elaborar plano litoestratigráfico y estructural (escala 1:4000). OE3: Correlacionar la reología de cada unidad con el estilo de fracturamiento y mineralización alojada. OE4: Identificar nuevos targets de exploración a partir del modelo correlacional.	H1: La cinemática de cada evento estructural (pitch y σ_2) se correlaciona directamente con la inclinación y posición de los ore shoots. H2: La composición química de la Fm. Chamará (CaO, MgO) se correlaciona con la formación de mantos vs. el carácter impermeable de la Fm. Aramachay (SiO ₂). H3: La fragilidad del Grupo Mitu se correlaciona con vetas continuas y bien conformadas, mientras la ductilidad del Grupo Excelsior con vetas ramaladas.	Ev.2 (N60-70°E, pitch 26°NE) → ore shoot 60°O Ev.3 (N45°E, pitch 42°SW) → ore shoot 45°NE + mantos Fm. Chamará Ev.4 (E-W, pitch 24-30°E) → ore shoot 59°O Fm. Chamará (permeable) → mantos Zn-Pb-Cu-Ag Fm. Aramachay (sello) → trampa estratigráfica	Cap. IV (Geología): estratigrafía y litología de grupos y formaciones. Cap. V (Geología Estructural): cuatro eventos, cinemática, ore shoots, reología, paleoesfuerzos. Anexos 1–4: datos de campo, petrografía, planos geológicos.	Mapeo geológico 1:4000 Fotointerpretación (ArcGIS) Medición estructural (65 datos: Az, Bz, Pitch) Diagramas de polos, rosetas y diedros rectos (Stereonet, FaultKin) Análisis de paleoesfuerzos (Win Tensor) Modelamiento 3D (Leapfrog Geo) Petrografía óptica (4 secciones delgadas) Modelos de bloques (leyes Zn, Pb, Cu, Ag)

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Problema

Las vetas polimetálicas, como yacimientos minerales son de gran importancia económica, han sido objeto de numerosos estudios geológicos a lo largo de la historia. Sin embargo, la comprensión de los controles estructurales que gobiernan su formación y distribución sigue siendo un tema de gran interés y debate en los sectores geológicos.

La mayoría de los trabajos ejecutados en las minas San Cristóbal – Carahuacra -Yauli, se han enfocado en estudios superficiales muy someros desarrollando cartografiados, muestreos de zonas alteradas entre otros, en las zonas donde se observan las manifestaciones aflorantes de sistemas de vetas que cortan secuencias de edad devónica hasta el jurásico. Estos estudios, muchos de ellos inéditos, están orientados al estudio de secuencias continentales que infrayacen a las secuencias marinas cretáceas, siendo el estudio de la geología estructural muy limitado y básico.

El objetivo de esta tesis de posgrado está orientado a tener una visión más técnica científica, desarrollando el primer estudio en la zona de los diversos controles estructurales que se manifiestan y afectan en diferentes grados el comportamiento litológico y adecuan sus deformaciones para la recepción de los diversos sistemas mineralizados.

Existen trabajos que antecedieron a la presente tesis y otros que son inéditos que hacen una descripción somera de vetas y su relación con estructuras tectónicas mayores, desarrollando modelos simples de formación basados en fallamiento y relleno de mineral, zonas de alteración en superficie para confirmar con estudios geofísicos y posteriormente ejecutar perforaciones diamantinas que en muchos casos no se lograba encontrar las zonas mineralizadas.

Los yacimientos mineros de San Cristóbal - Carahuacra, se tiene una serie de trabajos de carácter geológico, entre los principales estudios tenemos los llevados a cabo los años 1920 y 1928 por los geólogos Edwards, Dillingham y Stone; estos geólogos sentaron las bases geológicas del área publicando los primeros planos geológicos en la mina San Cristóbal.

Entre los años 1938 y 1949 varios geólogos realizaron estudios detallados con la idea de encontrar evidencias que justificaran la apertura de estos yacimientos, son pues notables las contribuciones de Snively y Kruger (1944) y Snively (1946), reportes internos de Cerro de Pasco Corporation, quienes resaltan la mineralización de tungsteno.

Entre los trabajos posteriores a 1949, puede mencionarse el realizado por R.W. Phendler (1959), quien realizó una descripción detallada de la geología del área de San Cristóbal – Carahuacra.

Wright hizo una investigación sobre la paragénesis y distribución de la mineralización de la veta Principal San Cristóbal.

Lyons (1968), Pastor Figueroa (1970), Rivera y Kobe (1983), Campbell et al. (1984), Kobe (1990), realizaron importantes trabajos de investigación en la zona; siendo los últimos trabajos de Vargas Samama, Bartlett y geólogos de Centromin Perú S.A., que contribuyen cada uno de ellos al mejor entendimiento geológico de estos complejos depósitos minerales cordilleranos y en consecuencia, al establecimiento de un activo centro minero que constituye San Cristóbal - Carahuacra.

Los sistemas mineralizados carecen de un estudio detallado y no se tuvieron estudios más complejos para los diversos parámetros estructurales que sirvan de guía para encontrar los sectores más económicos mineralizados en el área de estudio. Al no desarrollar estudios estructurales han generado problemas del tipo económico al tener sondajes sin que corte mineralización y su posterior aprovechamiento del sistema mineralizado. El control estructural desarrolla desplazamientos de los sistemas vetiformes que son la parte más beneficiosa y fundamental en la producción de la mina, esto incide en la búsqueda o seguimientos de los sistemas mineralizados, lo que provoca un mal control en la exploración afectando el beneficio económico. El presente

estudio detalla el sistema mineralizado y comportamiento estructural de las vetas mediante la toma de diversos datos cinemáticos en los sistemas de fallamientos que controla la zona y los diversos análisis de la alteración que afecta la roca encajonante que servirá para tipificar las diversas características de la mineralización. Esto permitirá tener un mejor control en el conocimiento geológico de la zona de estudio y servirá para una exploración y explotación sustentable.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Tectónica cenozoica en el postarco peruano

La tectónica cenozoica en el Perú, particularmente en el contexto del postarco, representa un periodo crucial en la evolución geológica de los Andes. Los procesos tectónicos que han dado forma a la región, analizando la interacción entre las placas tectónicas, la orogénesis andina, la sismicidad y el volcanismo. A través de una revisión de la literatura científica y estudios de campo, se busca proporcionar una comprensión integral de la tectónica en el Perú central durante el Cenozoico.

El Perú, ubicado en la convergencia de la placa de Nazca y la placa sudamericana, es un área de intensa actividad tectónica. La tectónica cenozoica, que abarca desde el cretáceo hasta el presente, ha sido fundamental en la formación de la cordillera de los Andes y en la configuración del paisaje peruano.

La tectónica de placas es el motor principal detrás de la evolución geológica del Perú. La subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana ha generado una serie de procesos tectónicos que han dado lugar a la elevación de los Andes y a la formación de diversas estructuras geológicas. Durante el Cenozoico, especialmente en el Eoceno y Oligoceno, se produjo una intensa orogénesis que resultó en la formación de pliegues, fallas y cuencas sedimentarias. La subducción de la placa de Nazca ha sido un factor determinante en la orogénesis andina. Este proceso ha llevado a la formación de una cadena montañosa que se extiende a lo largo de la costa

occidental de Sudamérica. La compresión resultante ha dado lugar a la formación de pliegues y fallas, que son características distintivas de la geología andina.

La tectónica cenozoica ha generado una variedad de estructuras geológicas en el Perú central. Las fallas Jerusalem, Yanama, Pancar, Ruri, Poma y Ticlio. Estas estructuras se encuentran en torno al domo de Yauli y no solo son importantes para entender la geología local, sino que también tienen implicaciones significativas para la evaluación del riesgo sísmico, (Lepry, 1981).

Bajo el título de “Caracteres generales de la evolución geológica de los Andes Peruanos”. Se presenta el estudio de la cadena de los Andes Peruanos, el cual muestra un modelo de evolución global de la Cordillera de los Andes desde la óptica de la tectónica de placas. Este Sistema montañoso es el resultado de la superposición de las orogenias herciniana y andina, (Dalmayrac et al., 1988).

Con el título “The Miocene Metallogenic Belt of Central and Northern Perú”. Analiza una franja metalogénica del Mioceno que se extiende por aproximadamente 900 km a lo largo de la Cordillera Occidental y la provincia de los altos plateaus en el centro y norte de Perú. Este cinturón se caracteriza por una abundancia de depósitos minerales hidrotermales formados entre 6 y 20 millones de años atrás.

La mineralización en este cinturón está íntimamente relacionada con la actividad volcánica calcoalcalina de composición intermedia y la intrusión de diques y stocks de características mineralógicas y químicas similares. Estos eventos magmáticos ocurrieron en una corteza continental madura que ha experimentado múltiples episodios de deformación compresiva desde el Paleozoico medio hasta el Neógeno tardío. Los depósitos minerales en esta región varían desde sistemas de pórfidos y skarns asociados hasta depósitos polimetálicos y de metales preciosos formados a temperaturas relativamente más bajas. Ejemplos notables incluyen el pórfido de cobre La Granja, el pórfido de cobre aurífero Michiquillay y el sistema de pórfido de molibdeno y tungsteno Mundo Nuevo-Tamboras-Compaccha. Muchos de estos depósitos

están alojados en rocas sedimentarias del Triásico tardío, Jurásico y Cretácico, así como en rocas volcánicas e intrusivas principalmente del Neógeno.

Los depósitos clásicos de metales básicos y preciosos del centro y norte del Perú se encuentran dentro de distritos polimetálicos zonificados, algunos con uno o más centros de pórfido. Muchos distritos presentan vetas o cuerpos de reemplazo que contienen enargita en sus partes centrales, y varios se caracterizan por depósitos de tipo veta y de reemplazo de caliza. En varios distritos polimetálicos, por ejemplo, Julcani, Yauricocha, Morococha, Casapalca, Huarón, Raura, Antamina, Pasto Bueno, Quiruvilca, Algamarca y Hualgayoc.

El estudio destaca la relación temporal y geométrica entre la mineralización y los eventos tectónicos compresivos del Mioceno, como los eventos Quechua I y II, que influyeron en la formación y distribución de estos depósitos minerales (Noble y McKee, 1999).

La interacción entre las placas tectónicas en el Perú central ha dado lugar a una alta sismicidad. Los terremotos en esta región son el resultado de la acumulación de tensión en las fallas activas, que se libera de manera repentina. La historia sísmica del Perú está marcada por eventos significativos, como el terremoto de Lima de 1970, que resaltó la vulnerabilidad de la región a desastres naturales. (Villegas et al., 2010).

En la Figura 1, Rhys et al. (2020) representan la ilustración esquemática de varios estados de tensión de arco y configuraciones tectonomagmáticas de márgenes convergentes (diagramas de la izquierda), y posiciones asociadas y geometría de diferentes estilos de depósitos epitermales que pueden formarse en estos ambientes (diagramas insertados a la derecha). IS = sulfuración intermedia; LS = sulfuración baja; HS = sulfuración alta; SCLM = manto litosférico subcortical. Los depósitos individuales pueden desviarse de los patrones idealizados que se muestran aquí debido a cambios temporales en las condiciones de tensión intraarco, cambios volumétricos locales en los cuerpos magmáticos subyacentes y

características volcánicas, paleotopografía, interacción de fallas, herencia de fallas, configuración local de rocas hospedantes volcánicas y del basamento, y otros factores. **A:** Arco en extensión caracterizada por fallas normales paralelas al arco y volcanismo voluminoso. Los sistemas de vetas epitermales IS y LS ocurren en vetas y fallas paralelas al arco, vinculadas localmente o controladas por vetas y fallas de deslizamiento oblicuas transversales al arco. **B:** Arco en compresión (convergencia ortogonal), mostrado aquí con aplanamiento de losas y engrosamiento de la corteza. Las fallas inversas son paralelas al arco. Las fallas de deslizamiento oblicuas transversales al arco y las fallas extensionales ortogonales al arco cruzan el arco y localizan el vulcanismo. Las vetas IS son perpendiculares al arco y se superponen localmente a los sistemas de pórfido. La mineralización HS y los litocaps asociados siguen tendencias litológicas y de fallas paralelas al arco, o se presentan en corredores extensionales oblicuos y normales al arco. **C:** Subducción oblicua con deformación regional transtensional o transpresional y fallas divididas en fallas de desgarre paralelas al arco y fallas transversales al arco. El vulcanismo y los depósitos IS y HS están asociados con flexiones, cuencas de separación y quiebres o desniveles en fallas de desgarre. Las vetas y las fallas normales mineralizadas se presentan en orientaciones oblicuas al arco respecto de las ortogonales, extendiéndose localmente a lo largo de las fallas de desgarre que las delimitan. Las fosas extensionales en el arco posterior pueden estar alineados oblicuamente al arco.

En la Figura 2, Tarbuck y Lutgens (2010) muestran las velocidades de la expansión del fondo oceánico basadas en el espaciado de las franjas magnéticas datadas (anomalías). Las flechas coloreadas muestran los datos sobre el movimiento de placas obtenidas por la Interferometría basal muy larga (VLBI) en localizaciones seleccionadas.

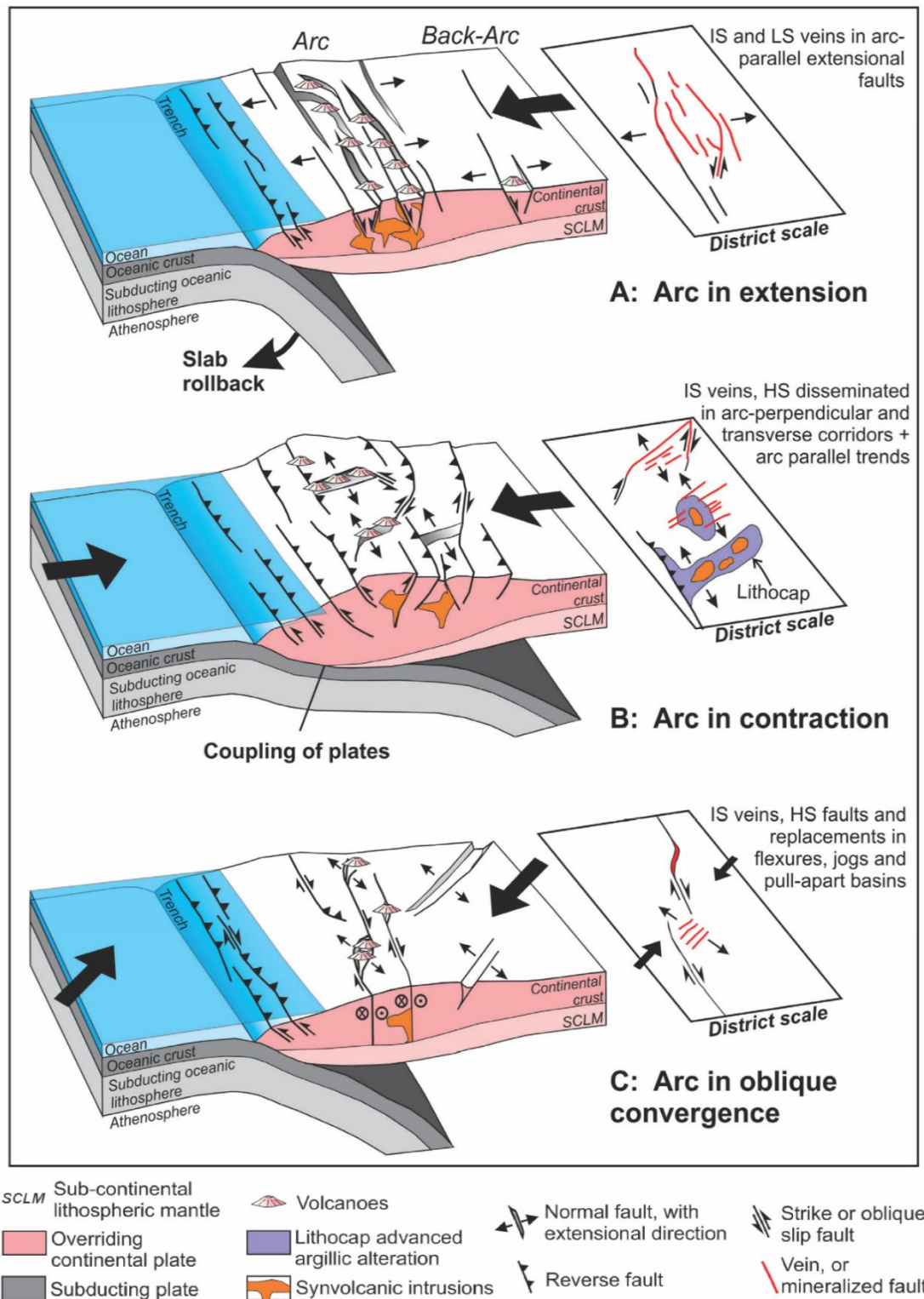
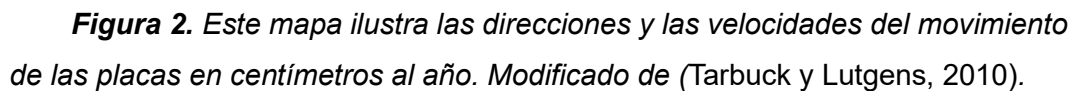


Figura 1. Geometría del ascenso magmático en arcos con distintos regímenes. Tomado de (Rhys et al., 2020). Nota: Arco en extensión B) Arc en compresión C) Arco en convergencia oblicua.



Los vectores de convergencia describen la dirección y la velocidad de los movimientos relativos entre placa (Figura 3), para el cenozoico en particular basado en evidencias físicas, sugiere que hay una convergencia oblicua puede llevar a la creación de fallas de rumbo, además de los pliegues y fallas inversas típicas de convergencia perpendicular; asimismo cabe mencionar que los vectores de convergencia no son constantes, sino que han variado a lo largo del tiempo geológico en cuanto a la dirección y velocidad, la convergencia oblicua y los cambios en los vectores de convergencia han jugado un papel crucial en la deformación de la corteza en el margen occidental del Perú, en especial en la formación de estructuras geológicas como el levantamiento de la cordillera de los Andes, la generación de cuencas sedimentarias y la actividad sísmica y volcánica. Las placas tectónicas involucradas en la convergencia en el margen occidental peruano durante el Cenozoico están las placas de Nazca, Farallón que se subdujo debajo de la placa de Sudamérica (Somoza y Ghidella, 2005).

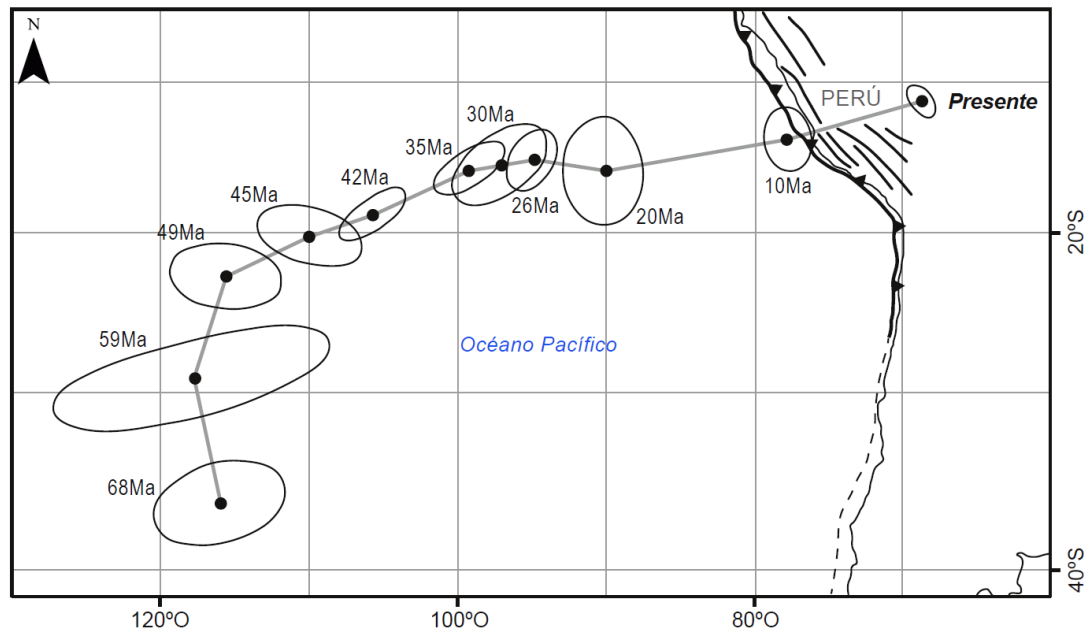


Figura 3. Vectores de convergencia de placas tuvieron direcciones NE-SO y O-E durante el Cenozoico. Modificado de (Pardo-Casas y Molnar, 1987).

2.2.2. Geometría de estructuras tectónicas

La geometría de las estructuras geológicas en la tectónica andina se caracteriza por la complejidad de sus plegamientos, fallas y la interacción de placas tectónicas. La subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana ha dado lugar a una serie de estructuras geológicas que son fundamentales para entender la tectónica de los Andes. A continuación, se presentan los aspectos clave de esta geometría:

Elementos clave a considerar:

Contexto tectónico general: La subducción oblicua de la placa de Nazca ha generado un régimen tectónico dominado por la compresión, pero con componentes de cizalla y extensión locales. Esta variedad de esfuerzos ha dado lugar a una amplia gama de estructuras, desde pliegues y fallas hasta mantos de corrimiento y zonas de cizalla.

Heterogeneidad de la corteza: La composición heterogénea de la corteza continental, con rocas de diferentes edades y propiedades mecánicas, ha influido significativamente en la distribución y geometría de las estructuras.

Evolución polifásica: La tectónica andina ha sido un proceso continuo, pero con diferentes etapas de deformación. La superposición de eventos tectónicos ha dado lugar a estructuras complejas, con geometrías que reflejan la historia de deformación.

Influencia de la litosfera inferior: La interacción entre la litosfera inferior y la corteza ha jugado un papel importante en la formación de grandes estructuras, como los mantos de corrimiento y las zonas de despegue.

Principales estructuras y su geometría:

Pliegues: Su geometría está controlada por la orientación de los esfuerzos principales, la naturaleza de las capas sedimentarias y la competencia de las rocas. Se pueden encontrar pliegues simétricos, asimétricos, tumbados y recumbentes, así como pliegues isoclinales y similares a fallas.

Fallas: Las fallas inversas y de desgarre son dominantes en el contexto andino. Su geometría está influenciada por la orientación de los esfuerzos principales, la presencia de planos de debilidad preexistentes y la heterogeneidad de la corteza. Las fallas pueden ser simples o formar sistemas complejos de fallas.

Mantos de corrimiento: Estos grandes cuerpos rocosos han sido desplazados decenas o cientos de kilómetros. Su geometría está controlada por la dirección de la compresión, la presencia de zonas de despegue y la resistencia de las rocas.

Zonas de cizalla: Representan zonas de deformación dúctil y frágil, a lo largo de las cuales se ha producido un desplazamiento significativo. Su geometría puede ser compleja, con bandas de cizalla, milonitas y zonas de brecha.

2.2.3. Cinemáticas de los sistemas de fallas

La clasificación cinemática de fallas empleando los estudios de Angelier (1994) permite entender mejor las formas de movimiento tectónico.

En especial y para este caso, ayuda a discriminar entre cinemáticas principales (de desgarre/oblicuas) de otras secundarias provocadas por extensión o compresión.

Para el caso específico de San Cristobal - Carahuacra, mediante el cartografiado geológico se determinó cuatro eventos estructurales, el primer evento estructural está estrechamente relacionado a la tectónica andina donde ocurren plegamientos y fallamientos de dirección NW-SE, en rocas favorables como la Formación Chambará tenemos la formación de mantos, el segundo evento estructural corresponde a fallamientos de dirección N60 - 70°E con buzamientos de entre 70° a 78° al NW con una cinemática dextral normal, como tercer evento estructural tenemos fallas de dirección N45°E con buzamientos de 70° a 76° al SW cuya cinemática es dextral normal, finalmente está el cuarto evento estructural representado por fallas de dirección N70°E a E-W con buzamientos de 70° a 77° al SE y Sur respectivamente, tiene una cinemática sinistral normal. En la figura 4 se encuentran representados los diferentes eventos estructurales que bajo la clasificación de Angelier, (1994), el evento 3 corresponde a fallas de deslizamiento oblicuo, mientras que los eventos 2 y 4 se posicionan al límite entre fallas de deslizamiento oblicuo y fallas de desgarre.

2.2.4. Origen de los fluidos mineralizantes

Los fluidos mineralizantes en los depósitos epitermales de BS son por lo general, originados mayoritariamente a partir de aguas meteóricas. La química de los fluidos en campos geotérmicos actuales, de pH aproximadamente neutro, está determinada por la interacción de las celdas de convección del agua meteórica con las rocas encajantes a niveles intermedios, aunque normalmente se infiere una componente indeterminada de fluidos magmáticos en profundidad. En contraste, los fluidos mineralizantes en epitermales de AS son de origen mayoritariamente magmático, pudiéndose mezclar con aguas meteóricas a diferentes profundidades. En el caso de los depósitos epitermales de SI, la composición de los fluidos a partir de los cuales

se formaron es también intermedia, entre magmáticos y meteóricos, (Albinson et al., 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

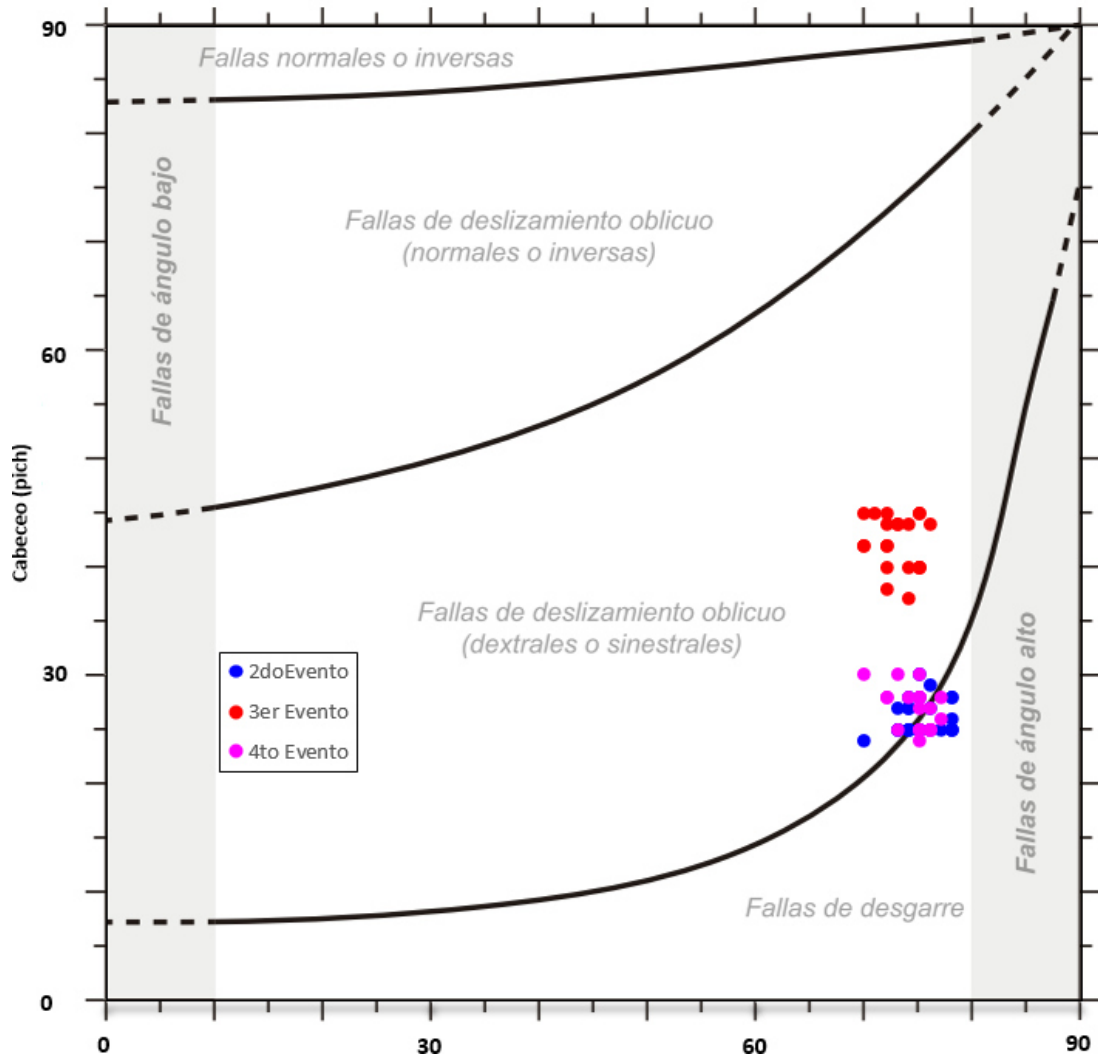


Figura 4. Clasificación de fallas basada en el buzamiento y cabeceo.

Modificado de (Angelier, 1994).

Los fluidos formadores de depósitos epitermales pueden evolucionar desde un fluido temprano sumamente reactivo, que interacciona fuertemente con las rocas encajonantes en profundidad, hasta un fluido más reducido, eventualmente de carácter más bien correspondiente a BS, que puede originar la mineralización. En ambos casos, los principales fluidos involucrados en la formación de los depósitos son, bien de origen magmático,

o bien de origen meteórico, aunque en algunos casos se han hallado contribuciones de agua marina, sea en depósitos epitermales o en sus análogos geotérmicos actuales (Bogie y Lawless, 1987; Müller et al., 2002).

A pesar de los problemas que conlleva la interpretación de los datos procedentes de los depósitos epitermales de AS, BS y SI, derivados en parte de los procesos geológicos a los que se ven sometidos los fluidos mineralizantes, es posible dilucidar el origen u orígenes de los fluidos mineralizantes. Dicha determinación puede realizarse a partir del análisis de las siguientes relaciones isotópicas y componentes químicos (Simmons, 1995): $3\text{He}/4\text{He}$, $\text{N}_2\text{-Ar-He}$, $\delta^{18}\text{O}$, δD y la concentración total de Cl (cloruros) en los fluidos mineralizantes. El uso de todos estos métodos está invariablemente ligado al estudio de las paragénesis minerales y de las inclusiones fluidas.

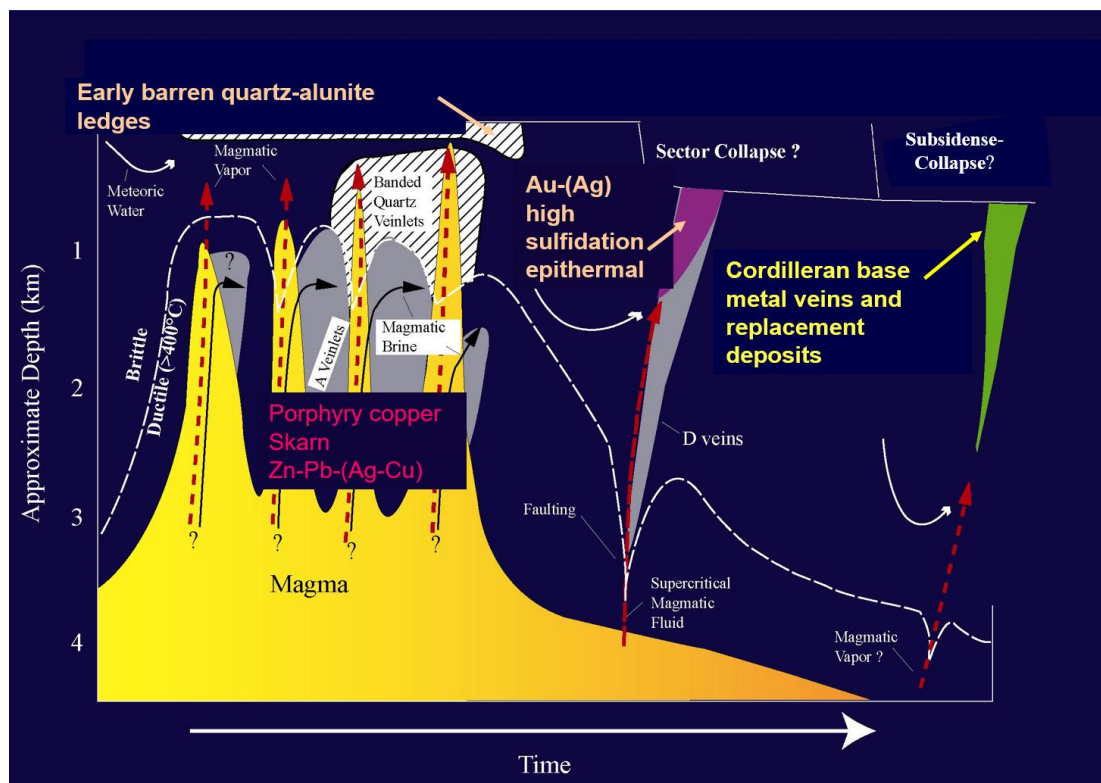


Figura 5. Vetas cordilleranas de metales base y cuerpos de remplazamiento. Modificado de (Bendezu et al., 2003; Muntean y Einaudi, 2001).

Los depósitos cordilleranos de metales base (veta, mantos y cuerpos de remplazamiento) están asociados a fluidos tardíos, se forman después de los depósitos pórfidos de cobre y skarn de zinc plomo (plata y cobre), seguidamente tenemos a los depósitos epitemales de alta sulfuración con mineralización de oro (plata) y finalmente tenemos a las vetas cordilleranas de metales base y cuerpos de remplazamiento (figura 5).

Por otro lado, en la (figura 6) se ilustra la configuración de los depósitos cordilleranos respecto a la cámara magmática, cerca de ésta tenemos depósitos tipo pórfido y skarn los mismos que son clasificados como V1, por otra parte, los depósitos más distantes de la cámara magmática son clasificados como V2 donde se tiene la ocurrencia de vetas y mantos.

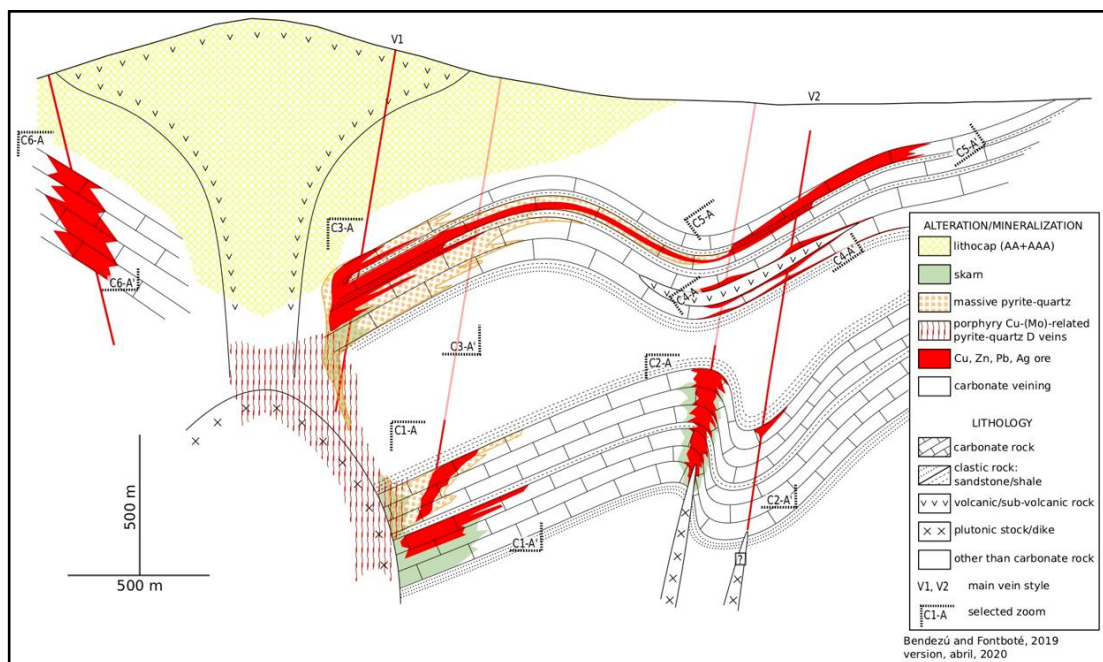


Figura 6. Modelo conceptual de depósitos cordilleranos V1 cuerpos V2 vetas. (R. Bendezu, comunicación personal, 26 de mayo de 2023).

Para que se formen cuerpos de reemplazamiento y mantos se necesita de la presencia de fluidos de mayor temperatura con minerales característicos como la marmatita, calcopirita y pirrotita (figura 7).

Los estadios se clasifican en tres: **El Estadio A** (LS) se caracteriza por la presencia de minerales de mayor temperatura tales como marmatita, calcopirita, pirrotita, casiterita, wolframita, siderita, magnetita y pirita. El **Estadio B** (IS) está representado por pirita cuarzo, finalmente el **Estadio C** (HS a IS o IS, a veces LS. Estas variaciones se deben a la expansión y contracción del sistema hidrotermal) tiene como minerales principales a la esfalerita, galena, sulfosales, oropimente, rejalgar y carbonatos (Figura 7).

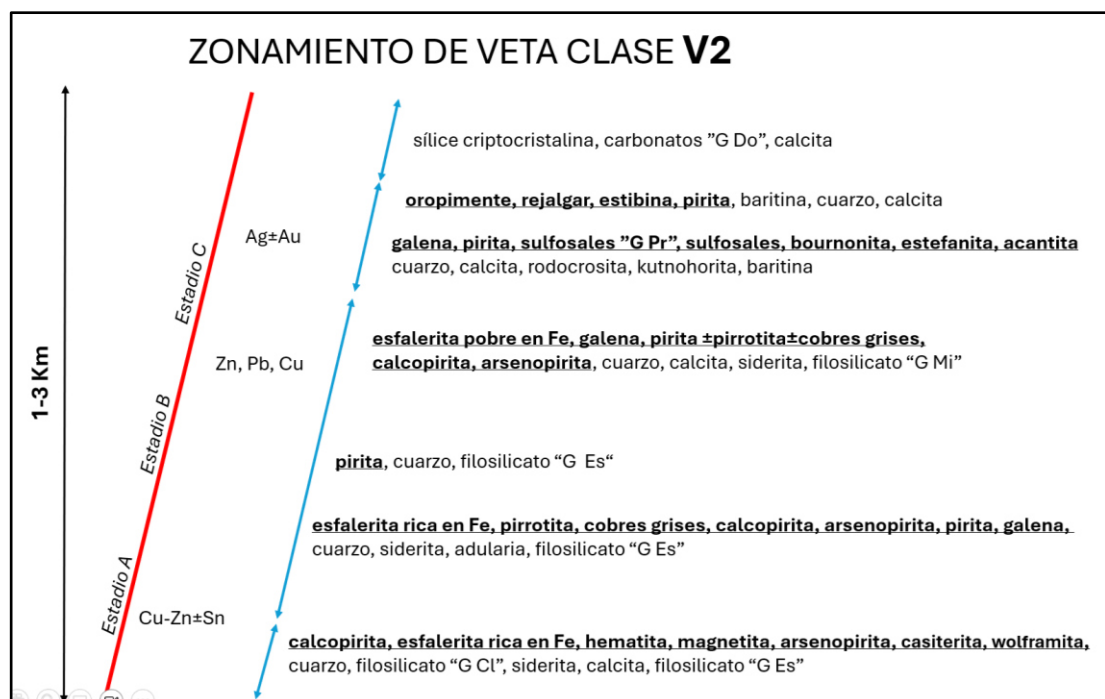


Figura 7. Zonamiento de la mineralización en vetas cordilleranas de metales base, con sus respectivos estadios. (R. Bendezu, comunicación personal, 26 de mayo de 2023).

2.2.5. Interacción de la salida de los fluidos mineralizantes

Varios autores han enfatizado la estrecha relación entre el ciclo sísmico y la migración de fluidos hidrotermales y su posterior precipitación en fallas de rumbo, (Hill, 1977; Shaw, 1980; Sibson, 1987, 1990, 1996). Según Sibson (1990), durante el desplazamiento sísmico en una falla de rumbo maestra, se generan rupturas que constituyen canales altamente favorables para la

circulación de fluidos hidrotermales, entre los cuales destacan los codos dilatacionales, los cuales poseen variados tipos de estructura interna (figura 8). En fallas de rumbo, la relación de orientación entre las fracturas de extensión, los codos y la dirección de desplazamiento de la falla genera ejes más largos que en el caso de las fallas normales o inversas (figura 8), produciendo una permeabilidad que favorece el flujo paralelo al esfuerzo principal intermedio (σ_2), permitiendo la buena conectividad vertical, facilitando el ascenso de los fluidos (Cox et al., 2001).

Existen dos mecanismos principales en la interacción dinámica falla-fluido (figura 9) falla válvula y bomba de succión, ambos estudiados en sistemas de venas oro-cuarzo hospedadas en zonas de falla (Sibson, 1987; Sibson et al., 1988).

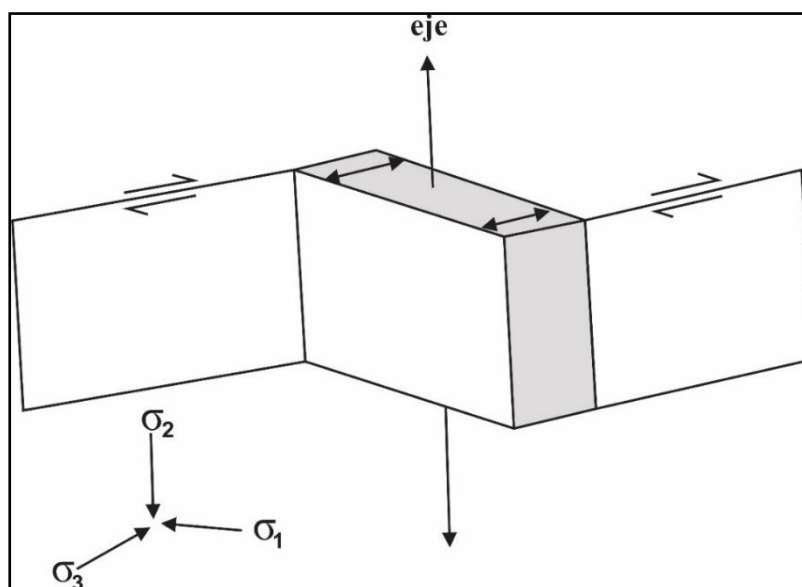


Figura 8. Geometría de un codo dilatacional en relación con la dirección de desplazamiento de la falla. El desarrollo de ejes intermedios (σ_2) permite una buena conectividad vertical en fallas transcurrentes, por ende, el fácil ascenso de fluidos. Modificado de (Cox et al., 2001).

El mecanismo falla válvula cumple un rol importante en el desarrollo de mineralización mesotermal generada a mayor profundidad ($> 4\text{km}$), en asociación con fallas inversas de alto ángulo u oblicuas. Promueve las fluctuaciones cíclicas en la presión de fluido (Figura 9E), desde valores

suprahidrostáticos a hidrostáticos, involucra una descarga post-fractura de fluidos sobrepresurados a través de redes de fallas y fracturas, abriendo barreras impermeables (Cox, 1995; Sibson, 2001). En contraste, la bomba de succión aprovecha la perturbación o detención de rupturas sísmicas en los codos dilatacionales, reduciendo localmente la presión de fluido e induciendo succiones opuestas a la transferencia de desplazamiento a través del codo (Figura 9E). Además, este fracturamiento forzado puede producir brechización por implosión hidráulica.

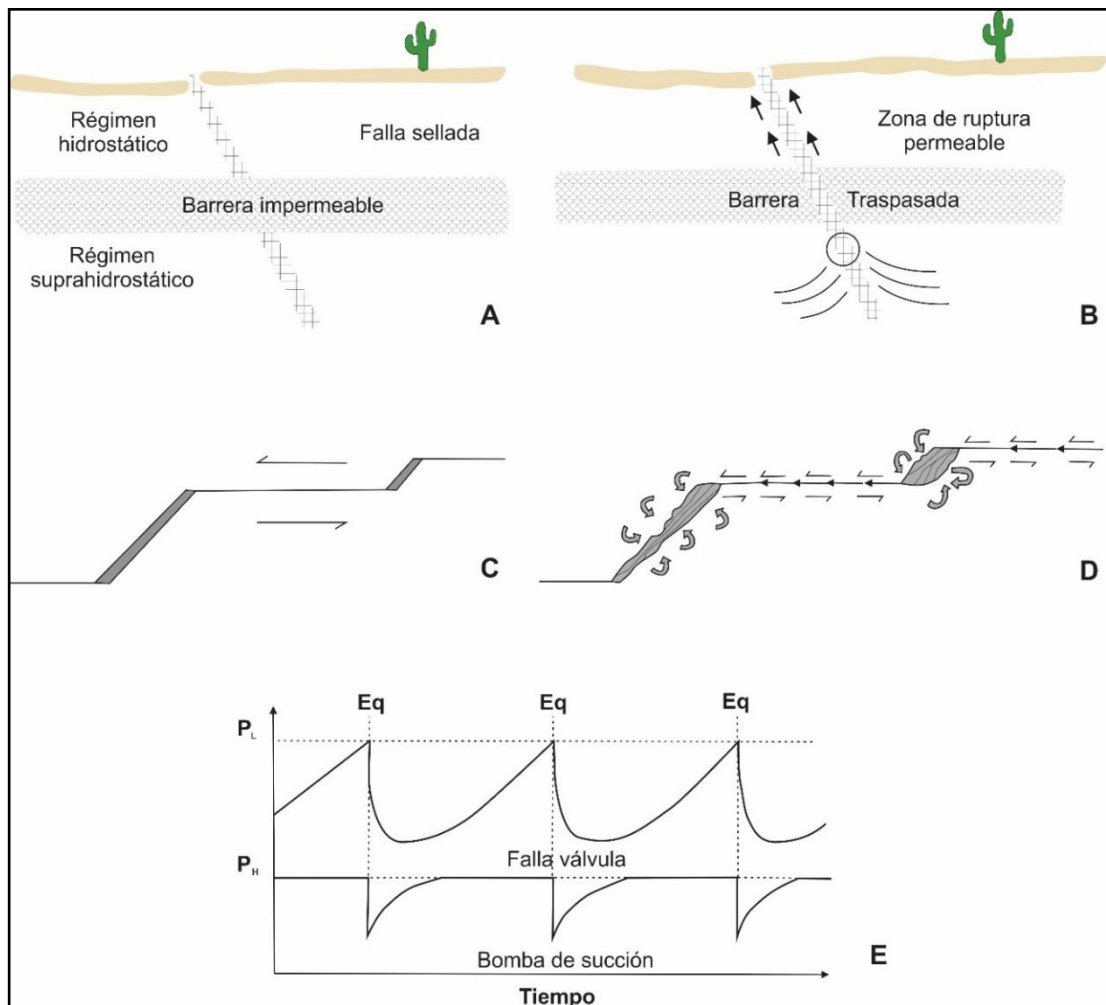


Figura 9. Representación esquemática del mecanismo de bomba de succión. Modificado de (Sibson, 1987).

Nota: A) Pre-ruptura, presión de fluido uniforme. B) post ruptura, flujo hacia codos dilatacionales. Funcionamiento de una falla válvula. (Sibson et al., 1988; Sibson, 1990), durante la etapa previa a la ruptura (C) donde una barrera impermeable separa los regímenes de presión de fluido hidrostático y supra

hidrostático; (D) cuando ocurre la descarga de los fluidos acumulados por el rompimiento del sello en fallas. (E) La acción de ambos mecanismos es acompañada por ciclos en la presión de fluido en relación con la ocurrencia de sismos (E_q) a través del tiempo, (Sibson, 2001). Estas variaciones van desde niveles de presión litostática (P_l), en el caso de la falla válvula, hasta presión hidrostática (P_h) para la bomba de succión.

Este proceso se extiende hasta que la presión de fluido se equipare con la presión hidrostática, y se registra en los niveles superiores de la corteza (< 4km), por lo tanto, se relaciona a mineralización epitermal asociada a fallas normales y/o de rumbo. En San Cristobal Carahuacra tenemos fallas de deslizamiento oblicuo dextrales y sinestrales que han permitido el ascenso de fluidos mineralizantes, estos corresponden a depósitos cordilleranos (vetas y Mantos), Estadío A para mantos y Estadios A, B y C para vetas.

2.2.6. Método de los Diedros Rectos

Según Angelier (1994), los diedros rectos son una representación gráfica utilizada en el análisis de esfuerzos en geología estructural. Se basan en la división del espacio en cuatro cuadrantes ortogonales (diedros) delimitados por dos planos perpendiculares que contienen los ejes principales de esfuerzo σ_1 (máximo) y σ_3 (mínimo).

Por otro lado, esta metodología nos permite identificar los posibles planos de falla y sus direcciones de deslizamiento en función del régimen de esfuerzos actuantes en cada evento estructural, asimismo los diedros rectos se emplean para la determinación del tensor de esfuerzos a partir de datos de fallas y sus estrías, facilitando el análisis de deformaciones del macizo rocoso.

La figura 10 se ilustra el caso de los distintos tipos de fallas (normales, de rumbo e inversas) con su DATUM completo. En figura 10a se indican las fallas con el sentido de movimiento del bloque colgante señalado por una pequeña flecha “atada” a cada falla en su respectivo valor del rake de su estría de falla. En figura 10b se ilustran los diedros de acortamiento (en blanco) y

extensión (en negro) para dicho sistema. Aparecen también los ejes de acortamiento (**A**) y extensión (**E**), respectivamente, Niemeyer (1999).

2.2.7. Diagramas de Rosetas

El diagrama de rosetas (Figura 11) es una representación gráfica que se utiliza en geología estructural nos proporciona una visión general de la organización de geométrica de los datos estructurales, sirve para analizar la distribución direccional de estructuras lineales, como fallas, diaclasas, ejes de pliegues y alineaciones de minerales. El diagrama consiste en un gráfico circular donde se agrupan y cuantifican las orientaciones estructurales en intervalos angulares específicos, que nos permite identificar tendencias predominantes en una determinada región.

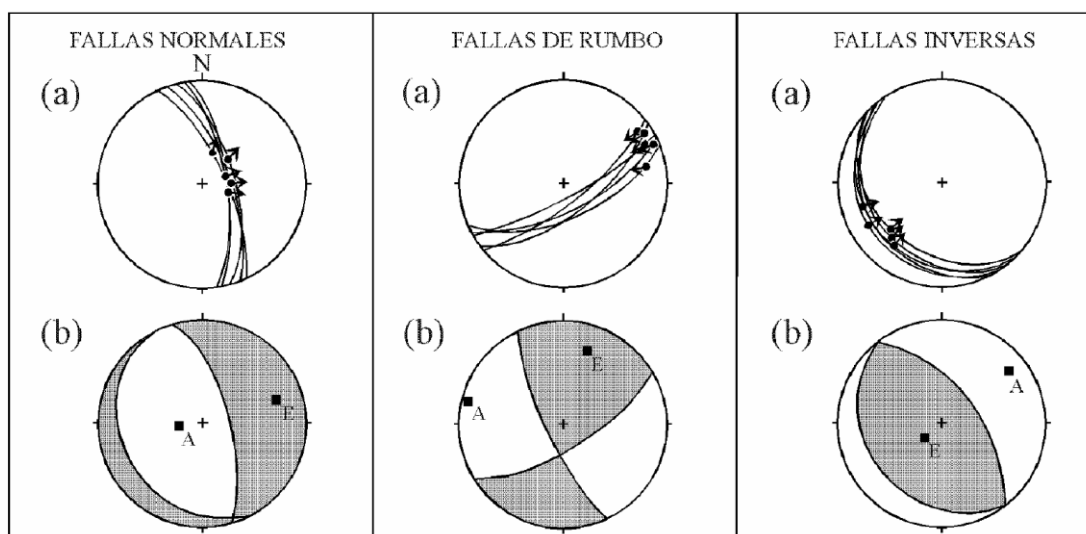


Figura 10. Método de los diedros rectos.

Nota: (a) Ploteo de los distintos tipos de fallas en red de Schmidt, hemisferio inferior. Las flechas indican los sentidos de movimiento del bloque colgante. (b) Diedros correspondientes a las fallas en (a). En blanco, diedro de acortamiento con su respectivo eje (A). En negro, diedro de extensión con su respectivo eje (E), modificado de Niemeyer (1999).

Según Ramsay y Huber (1987), el diagrama de rosetas es una herramienta fundamental en la interpretación de patrones estructurales, ya que facilita el reconocimiento de sistemas de fracturación y su relación con los esfuerzos tectónicos. Su construcción requiere la recolección de datos de orientación en campo, los cuales se representan mediante sectores radiales cuya longitud es proporcional a la frecuencia de ocurrencia en cada intervalo direccional.

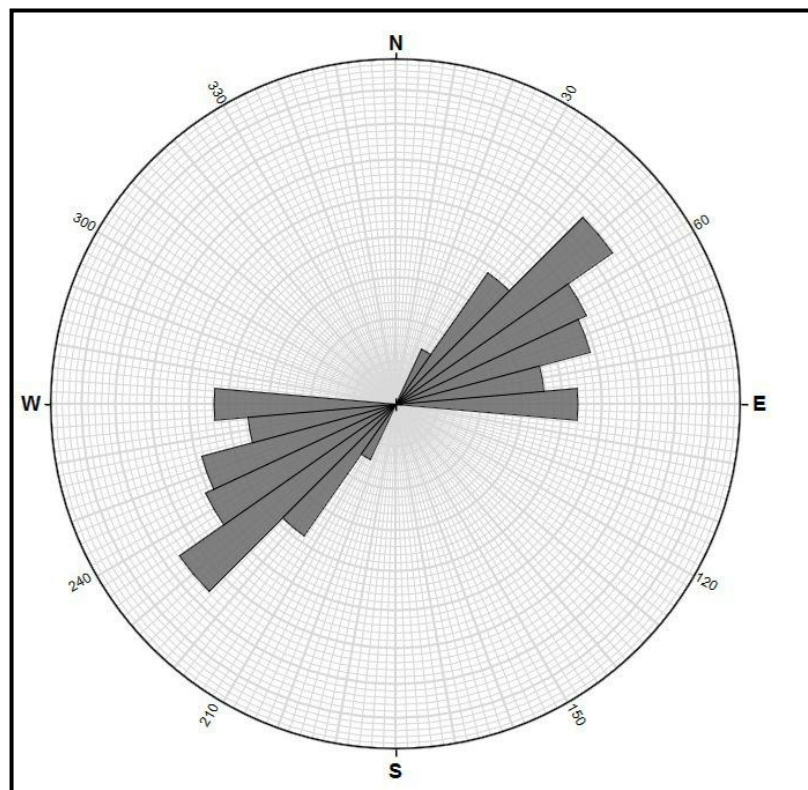


Figura 11. Diagrama de rosetas para el segundo, tercero y cuarto evento estructural.

2.2.8. Modelamiento estructural 2D y 3D

El modelamiento estructural en 2D y 3D es una técnica utilizada en geología estructural para representar y analizar la geometría, disposición y evolución de estructuras geológicas, como fallas, pliegues y sistemas de fracturación. Este método permite interpretar los procesos tectónicos y su

influencia en la deformación de las rocas, facilitando la exploración de recursos naturales y la evaluación de riesgos geológicos (Groshong, 2006).

2.2.8.1. Modelamiento estructural en 2D

El modelamiento en dos dimensiones (2D) se basa en la construcción de perfiles geológicos y secciones transversales, que permiten visualizar la distribución de las unidades geológicas y sus estructuras en un plano. Esta forma de representación es útil para ver la geometría de pliegues, fallas y discordancias a lo largo de una línea de corte específica dentro de plano en planta (Ramsay y Huber, 1987). Asimismo, cabe mencionar que para el presente trabajo se empleó datos de cinemática para los diferentes eventos estructurales.

Por otro lado, el usó software especializado, Leapfrog Geo para el modelamiento 3d, el cual optimiza el modelamiento estructural y facilita la integración y análisis de grandes volúmenes de datos geológicos (Laurent et al., 2016).

El modelamiento estructural en 2D y 3D es una herramienta muy importante en la geología moderna, ya que nos permite comprender la evolución de las estructuras geológicas y su impacto en diversas aplicaciones geocientíficas. Finalmente cabe mencionar que con el paso del tiempo se ha mejorado significativamente con los avances tecnológicos, permitiendo una mayor precisión en la caracterización e interpretación del subsuelo, en consecuencia, una toma de decisiones más robusta en cuanto a la exploración y planificación minera (Figura 12).

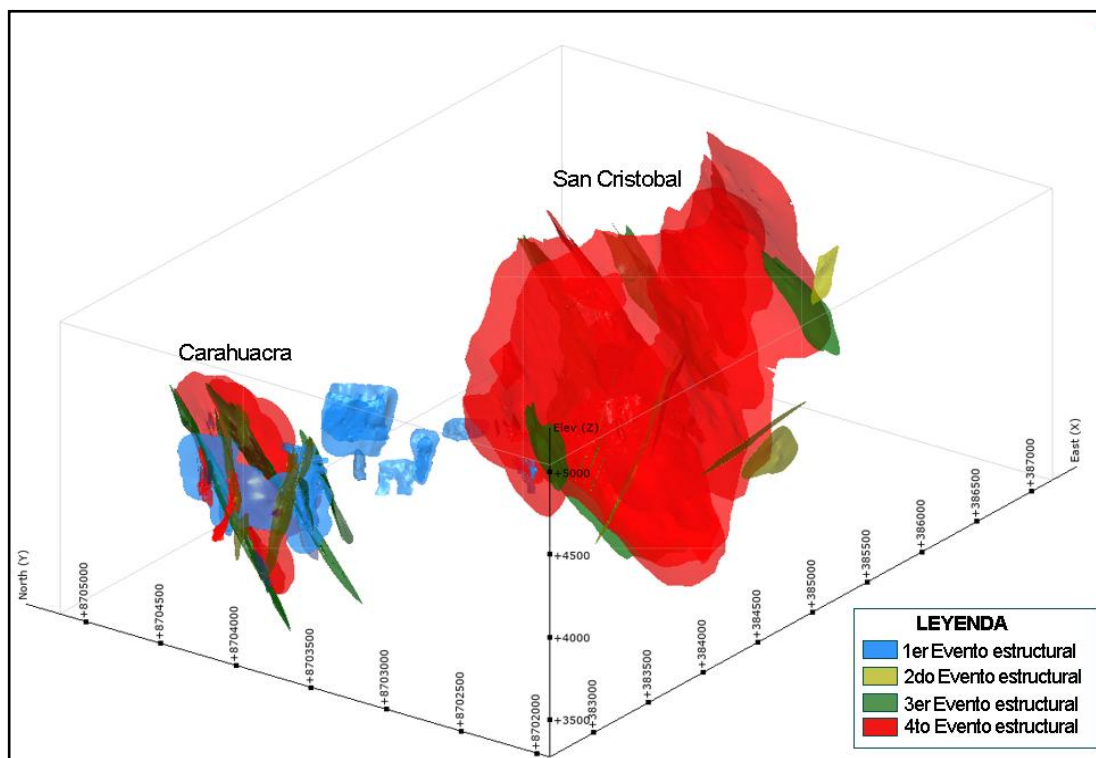


Figura 12. Modelamiento 3D de las minas San Cristóbal - Carahuacra con mineralización correspondiente a los diferentes eventos estructurales.

2.2.9. Domo de Yauli.

Es una estructura geológica ubicada en la Cordillera Occidental de los Andes en el centro de Perú, aproximadamente a 100 km al Este de Lima. Se caracteriza por su forma elongada, con dimensiones de aproximadamente 30 km de largo por 10 km de ancho, alineada con el rumbo andino, esta estructura es de gran interés por albergar mineralización polimetálica en la región. Hacia el Norte en el distrito Morococha se tiene el pórfido de Toromocho (Cu-Mo), skarns de $\text{Zn-Pb} \pm \text{Ag} \pm \text{Cu}$, mantos y vetas. Hacia el sur en el distrito de San Cristóbal, Carahuacra y Andaychagua, donde tenemos vetas mantos y Cuerpos polimetálicos $\text{Zn-Pb} \pm \text{Ag} \pm \text{Cu}$ (Figura 13).

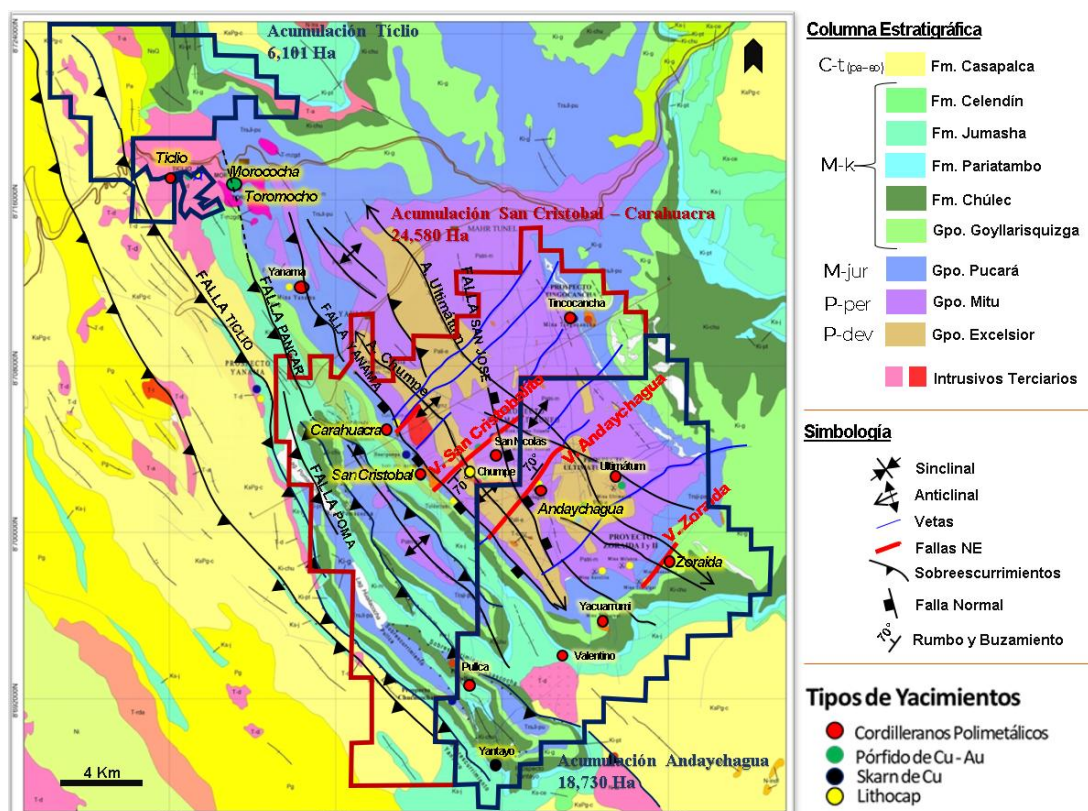


Figura 13. Plano geológico del domo de Yauli con los diferentes yacimientos y proyectos que alberga el domo de Yauli. Plano base (Salazar Díaz, 1983), con las principales estructuras, nombres de fallas según (Lepry, 1981).

2.2.10. Principales características de los yacimientos cordilleranos de metales base.

Según Fontboté, (2006) Las principales características de los yacimientos cordilleranos de metales base son las siguientes:

- Estrecha asociación en tiempo y espacio con actividad ígnea calcoalcalina, mismos sectores de producción que el pórfido Cu y depósitos epitermales Au-Ag de alta sulfuración.
- Epitermales: deposición a niveles someros por debajo de la paleosuperficie y a temperaturas inferiores a 300°C.
- Deposición "tardía" en la evolución del sistema porfídico.
- Conjuntos de metales Cu-Zn-Pb-(Ag-Au-Bi). Altas relaciones Ag/Au.

- Mucho más rico en sulfuros que el pórfido de cobre (hasta más de 50% de sulfuros).
- Principalmente ocurren como rellenos de espacios abiertos en rocas hospedantes silicatadas y como reemplazamiento en rocas carbonatadas.
- Zonificación bien desarrollada (minerales de mena y de alteración).
- Conjunto temprano frecuente de pirita-cuarzo ($\pm W$) que puede ser extenso y formar cuerpos grandes (y puede zonificarse en menas de Zn-Pb).

En resumen, los depósitos de metales base, epitermales formados en etapas tardías de un sistema de pórfido, frecuentemente HS son bien zonificados, pero no siempre.

¿Otro nombre nuevo?

No es realmente nuevo, es una clase de depósito conocida desde hace mucho tiempo para vetas polimetálicas que se encuentran en la parte superior de los sistemas de pórfido de cobre por ejemplo, (Sawkins, 1972; Einaudi, 1977, 1982, 1994): "vetas de metales base cordilleranos". De hecho: no solo vetas sino también grandes cuerpos de reemplazamiento.

Otros términos: Depósitos de vetas tipo butte, Depósitos zonificados de Cu-Zn-Pb-Ag", vetas de metales básicos zonificadas (*) Vetas de metales básicos de sulfuración alta / sulfuración intermedia (*) Problema con estos nombres: no siempre HS y, por lo tanto, no siempre tan bien zonificados/no siempre IS.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

3.1.1. Tipo de Investigación

- Investigación aplicada: El objetivo principal de este tipo de investigación es resolver problemas prácticos, en este caso, comprender los controles geológicos que influyen en la mineralización de un yacimiento específico con implicaciones directas para la exploración y explotación minera.

- Investigación descriptiva: Se busca describir las características de los controles estructurales y estratigráficos, así como su relación con la mineralización.

- Investigación explicativa: Se intenta explicar las causas y los mecanismos que han llevado a la formación y distribución de la mineralización.

3.1.2. Diseño de Investigación

- Diseño no experimental: Dado que no se manipulan variables de forma intencional, sino que se observan las relaciones existentes entre las variables estructurales, estratigráficas y la mineralización.

- Diseño transversal: Se recolectan datos en un único momento en el tiempo, lo que permite obtener una instantánea de la situación existente en las minas San Cristóbal y Carahuacra.

- Diseño correlacional: Se busca establecer la relación entre las variables, es decir, determinar si existe una asociación entre los controles estructurales, estratigráficos y la mineralización. En este estudio, la correlación se establece entre: (1) Variables independientes: orientación (rumbo y buzamiento), cinemática (pitch y movimiento de bloques), secuencia de los cuatro eventos estructurales, y litología

(reología diferencial de los grupos Excelsior, Mitu y Pucará); y (2) Variable dependiente: distribución geométrica, geometría (posición del ore shoot), potencia y leyes de los sistemas de vetas y mantos polimetálicos. La verificación de esta correlación se realiza mediante: análisis cinemático en campo (estrías, estructuras Riedel tipo R y T), diagramas de polos y rosetas (software Stereonet y FaultKin), análisis de paleoesfuerzos por el método de diedros rectos (software Win Tensor), y validación con modelos de bloques 3D en Leapfrog Geo. Los resultados cuantitativos demuestran que el σ_2 (eje de esfuerzo intermedio subvertical) controla la inclinación de los ore shoots en cada evento: 60° al Oeste para el Evento 2, 45° al NE para el Evento 3, y 59° al Oeste para el Evento 4.

3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis serían las estructuras geológicas (fallas, fracturas, pliegues) y las unidades litológicas (tipos de rocas) presentes en las minas San Cristóbal y Carahuacra. Estas estructuras y litologías se consideran los "controles" que influyen en la localización, forma y grado de la mineralización.

Sin embargo, para ser más precisos, podemos identificar diferentes niveles de unidad de análisis:

3.2.1. Estudio a nivel Regional:

- Yacimientos minerales: Las minas San Cristóbal y Carahuacra en su conjunto son las unidades de análisis principales. Se estudiará la distribución geométrica de la mineralización a escala de yacimiento.

3.2.2. Estudio a nivel Local:

- Cuerpos mineralizados: Cada cuerpo mineralizado dentro de las minas (vetas, disseminaciones, etc.) puede ser una unidad de análisis individual.

- Unidades litológicas: Cada tipo de roca presente en el área (pórvido dacítico, filitas, calizas, etc.) puede ser una unidad de análisis.

3.2.3. Estudio a nivel análisis de laboratorio:

- Muestras de roca: Las muestras individuales de roca colectadas en el campo son la unidad de análisis más pequeña. En estas muestras se realizarán análisis petrográficos y mineralógicos para determinar su composición y características.

- Estructuras microscópicas: Las estructuras microscópicas presentes en las rocas (fracturas, venillas, etc.) también pueden ser unidades de análisis, especialmente cuando se relacionan con la mineralización.

3.3. Población

- Mapas geológicos: Estos mapas muestran la distribución de las diferentes unidades rocosas y estructuras geológicas en la zona de estudio, desarrollando un control litológico en afloramientos, la escala de trabajo para el presente estudio es de 1/4000 (Anexo 4).

- Mediciones estructurales: Se realizaron aproximadamente más de 65 datos cuantitativos de mediciones de elementos estructurales de planos de falla los cuales cuentan con rumbo buzamiento y pich, se utilizó brújulas geológicas y clinómetros (Anexo 1).

- Ortofotos: Se puede apreciar en mayor detalle las características de las estructuras en el campo, como la geometría de las fallas, los tipos de pliegues y las relaciones entre las diferentes unidades rocosas.

- Muestras de rocas y eventos mineralizantes: Se recolectan muestras de rocas sin alterar y alterada para su análisis petrográfico, lo que permite determinar su composición mineralógica (Anexo 2 y 3).

3.4. Tamaño de muestra

En lo concerniente a la toma de muestras en el proceso del cartografiado geológico, se fueron tomando datos estructurales como rumbo y buzamiento de estratos, en lugares donde se tiene la presencia de fallas se tomó datos de cinemática de movimiento (pich) se procuró que estos sean de buena calidad. Asimismo, se tomó muestras de rocas por sectores para realizar estudios petrográficos donde la geología tiende a hacer diferente. Se tomaron 04 muestras para sección delgada.

Se tomo 65 datos estructurales de buena calidad de los distintos eventos estructurales, con la finalidad de tener buenos resultados que nos den seguridad en su aplicación.

Los datos recolectados para el presente trabajo se presentan de la siguiente manera:

En el anexo 01 se presentan los 65 datos de las de fallas con su ubicación, este, norte cota, rumbo, buzamiento, pich y movimiento. Asimismo, en el anexo 02 se muestra la descripción microscópica y macroscópica de 04 muestras, también en anexo 03 se tiene la agrupación de vetas por evento estructural tanto para San Cristóbal como para Carahuacra. Finalmente, en el anexo 4 se presenta un plano geológico escala 1/4,000 de San Cristóbal – Carahuacra, con su respectiva sección geológica.

3.5. Selección de muestras

El desarrollo de la selección de muestreo involucro un diseño del tipo sistemático, aleatorio y compuestos, para determinar lo siguiente:

- Tipo de mineralización: Las muestras principales y de mayor interés fueron Zn, Pb, Cu, Ag. El muestreo sistemático canales y de sondajes están incluidos en los modelos de bloques mostrados por eventos estructural.
- Control estructural: Las estructuras controlan la mineralización están definidas por datos cinemáticos tomados en los planos de fallas,

que nos dieron por resultados la conformación de un sistema del tipo Riedel confirmando cuatro eventos estructurales, originando fallamientos, vetas, zonas de cizalla entre otros.

3.6. Técnicas de recolección de Datos

3.6.1. Observación de la recolección de datos

La observación es una técnica de recolección de datos que se utiliza en investigaciones científicas. Consiste en la recopilación sistemática de información a través de la percepción directa de evidencias que demuestren solución a un problema, para el caso de la presente investigación se tomó como herramientas fundamentales la estratigrafía y la geología estructural. La estratigrafía nos muestra evidencias físicas de cómo ha sido el desplazamiento de bloques para cada evento estructural. La geología estructural por su parte a través de indicadores cinemáticos como estrías, estructura de tipo R, T nos indica cómo ha sido el movimiento de bloques en cada falla. Su principal ventaja radica en la posibilidad de obtener datos en tiempo real y de calidad. Los datos que no son de buena calidad no se les tomo en cuenta, esto con la finalidad de tener resultados óptimos.

3.6.1.1. Fotointerpretación

La fotointerpretación es una técnica que permite la recolección de datos litológicos, morfológicos, estructurales a partir de ortofotos e imágenes satelitales. Esta metodología es fundamental en estudios geológicos, nos proporciona información previa a una salida de campo para su toma de datos detalla según la escala de cartografiado.

En el proceso se identifican, lineamientos, fallas, cambios morfológicos, unidades litológicas, mediante el análisis de patrones de tonalidades, texturas y formas observadas en las imágenes. Para un adecuado procesamiento de la información se usa sistemas de información geográfica (SIG), que permiten una interpretación más precisa y georeferenciada en la cual se puede elaborar un plano geológico. En la presente investigación se usó el programa ArcGis.

Esta técnica facilita la investigación científica permitiendo cubrir amplias zonas y con control de campo permite tener una mejor comprensión, en cuanto a la continuidad de fallas y unidades litológicas.

3.6.1.2. Mapeo geológico de campo

El mapeo geológico de campo es un trabajo fundamental en la recolección de datos geológicos, tiene el propósito de identificación, descripción y representación de las diferentes unidades litológicas, fallas, rumbos y buzamientos en plano topográfico, corresponde a la etapa post fotointerpretación. Esta metodología nos permite obtener información directa y detallada sobre la composición, disposición y evolución del área de trabajo, es esencial para la elaboración de un plano geológico base, a partir del cual, se pueden hacer exploración en busca de recursos minerales, ya que permite la comprensión detallada referente a sus características geológicas.

Para el desarrollo de trabajo se emplean herramientas tales como plano topográfico, brújula, GPS, imágenes satelitales, ortofotos, cuadernos de campo y software de sistemas de información geográfica (SIG), que facilitan la elaboración de planos con los datos recopilados.

La adecuada ejecución en recolección de datos y representación en plano topográfico garantizara la obtención de información precisa y fiable para la toma de decisiones en la búsqueda de recursos minerales. En resumen, el mapeo geológico constituye una herramienta fundamental en la investigación geocientífica.

3.6.1.3. Procesamiento poscampo

El procesamiento poscampo es una etapa importante de la recolección de datos geológicos, en ella se organiza, analiza e interpreta la información recolectada en campo. Su objetivo es transformar los datos en bruto, en planos digitalizados con información litológica, estructural que sea

comprensible y se pueda generar modelos geológicos, estructurales y conclusiones científicas.

Este proceso involucra varias actividades, como la georeferenciación de planos de campo y posterior digitalización de datos recopilados en software con sistemas de información geográfica (SIG) para el caso de elaboración de planos, los datos estructurales por su parte son llenados en una base de datos y luego analizado en software especializados para el procesamiento de datos estructurales como Stereonet, FaultKin y Win Tensor. Con la adecuada interpretación permite generar resultados confiables y fiables para la toma decisiones, en el caso estructural nos permite saber cuál es la posición de los oreshoots y de acuerdo con ello elaborar los programas de perforación diamantina con una mayor certeza de encontrar nuevos recursos minerales.

3.7. Análisis e interpretación de la información

La etapa de análisis e interpretación de la información es fundamental en el proceso de recolección de datos, nos permite convertir los datos en conocimiento con el cual podemos llegar a conclusiones. En esta etapa, se identifican patrones, tendencias y relaciones que nos ayudan a comprender el caso estudiado de forma crítica y objetiva, de esta manera podemos tomar decisiones con fundamento y finalmente llegar a una conclusión fiable y generar conocimiento. Para ello nos apoyamos en modelos teóricos previos, referencias bibliográficas y trabajos previos.

CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA

4.1. Ubicación del área de estudio

Las minas San Cristóbal - Carahuacra, políticamente está ubicada en el distrito de Yauli, provincia del mismo nombre, departamento de Junín (Figura 14) geográficamente se encuentra en el flanco oeste de la Cordillera Occidental de los Andes centrales del Perú; a 110 Km. En línea recta de la ciudad de Lima, sus coordenadas son:

76°05' de Longitud Oeste

11°43' de latitud Sur

La altitud del distrito es de 4700 metros sobre el nivel del mar. La mina es accesible utilizando la carretera central, de la cual cerca de la localidad de Pachachaca parte un ramal de 20 km. Que conduce a las minas San Cristóbal – Carahuacra; además, el ferrocarril central tiene una estación en Yauli a 12 kilómetros el área.

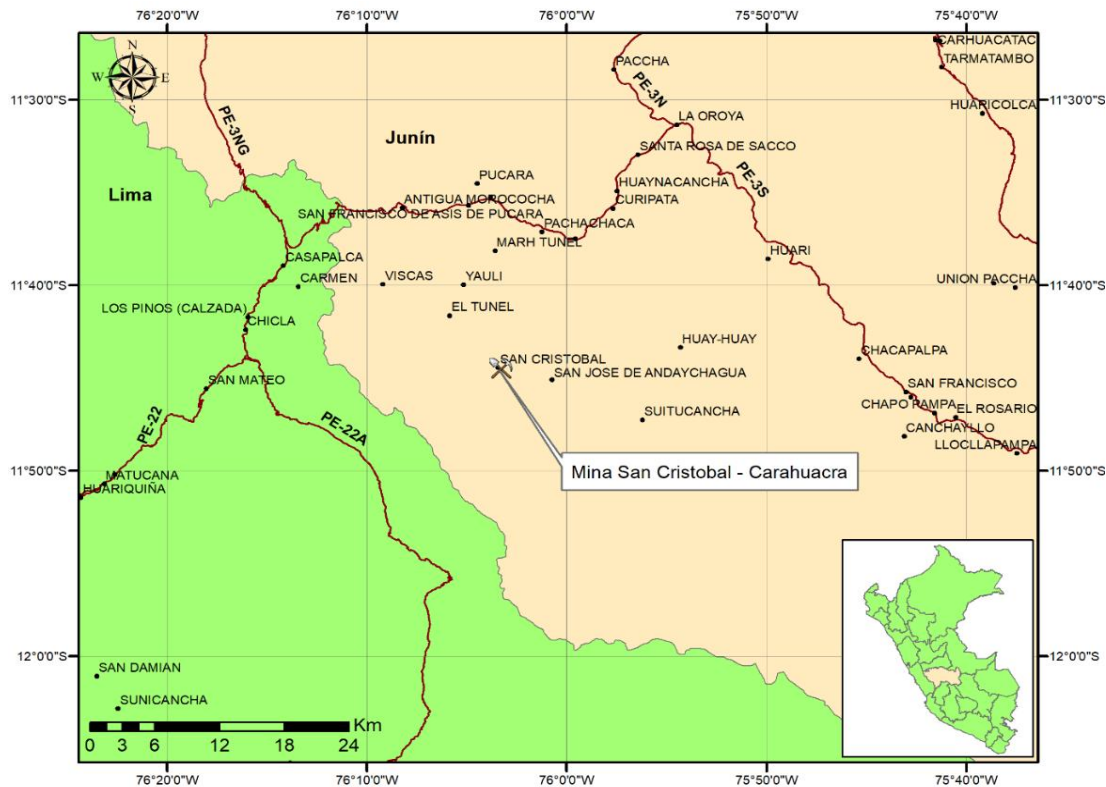


Figura 14. Plano de ubicación y acceso a las minas San Cristóbal - Carahuacra.

4.2. Geología Regional

4.2.1. Grupo Excelsior

El Grupo Cabanillas fue definido por Newell (1945) y se caracteriza por la presencia de limoarcillitas interestratificadas con areniscas cuarzosas verdes. En la hoja de La Oroya (24-I), esta unidad fue cartografiada como Grupo Excelsior por McLaughlin (1925) quien la describe como limoarcillitas interestratificadas con areniscas pizarrosas intensamente plegadas y fracturadas.

Posteriormente, Paredes (1976) la denominó como Flysch en la localidad de Concepción y más tarde Mégard et al. (1996) la eleva a la categoría de formación. No obstante, basándose en correlaciones litoestratigráficas y evidencias fosilíferas se ha preferido la denominación de Grupo Cabanillas. Geográficamente esta unidad estratigráfica se encuentra en la región de los Andes Centrales, sur del Perú y partes de Bolivia. Para la presente tesis se tomará el nombre de Grupo Excelsior debido a que los diversos planos geológicos locales que se tienen esta con esta denominación.

4.2.1.1. Litología.

El Grupo Excelsior está compuesto predominantemente por secuencias sedimentarias. Se encuentran intercaladas por lutitas, areniscas y calizas (en forma local las secuencias están metamorfizadas encontrándose filitas, mármol y metavolcánicos, ubicados en el centro de los andes peruanos). Estas litologías se originaron a partir de sedimentos depositaron en ambientes marinos, evidenciando que la región durante el Devónico estaba cubierta por un mar.

4.2.1.2. Ambientes de Depositación.

La formación de rocas sedimentarias, evidencian una evolución en los ambientes de depositación que abarca desde plataformas carbonatadas someras hasta ambientes marinos más profundos como taludes continentales

y cuencas de antearco. Las características de las rocas sugieren un ambiente de sedimentación que puede incluir arrecifes y llanuras marinas.

4.2.1.3. Fósiles.

El Grupo Excélsior es conocido por su contenido fósil, que incluye una variedad de organismos marinos, como braquiópodos, bivalvos, trilobites y corales. Estos fósiles son fundamentales para entender la biodiversidad y los ecosistemas del Devónico.

4.2.1.4. Tectónica y Estructura.

La región ha experimentado una intensa actividad tectónica, lo que ha resultado en el plegamiento y la diversidad de sistemas de fallamientos en las secuencias estratigráficas. Esto es típico en los Andes, donde las placas tectónicas han interactuado a lo largo de millones de años. El Grupo Excélsior se encuentra a menudo en contacto con otras formaciones geológicas más jóvenes debido a este proceso.

4.2.1.5. Estructuración de Cuencas.

La tectónica también ha jugado un papel crucial en la formación de cuencas donde se acumulan sedimentos. La actividad tectónica puede crear depresiones y zonas de hundimiento (sinclinales) donde los sedimentos se depositan. En el caso del Grupo Cabanillas, estas cuencas se formaron en un contexto de compresión y extensión, lo que permitió la acumulación de sedimentos fluviales y lacustres.

4.2.1.6. Variaciones en el Ambiente de Sedimentación.

La actividad tectónica puede causar cambios en el entorno geológico que afectan el tipo de sedimentos que se depositan. Por ejemplo, durante periodos de actividad tectónica intensa, los ríos pueden ser más erosivos, transportando sedimentos de las montañas hacia las cuencas. Desarrollando

variedades de sedimentos en el Grupo Cabanillas, que incluye arenas, limos y arcillas.

4.2.1.7. Desarrollo de Fosas y Cuencas.

El Grupo Cabanillas se asocia con la formación de la cuenca de Cabanillas, que se desarrolló en un contexto de tectónica activa. Las fallas y pliegues generados por la tectónica han influido en la distribución y características de los sedimentos, creando un paisaje geológico diverso.

4.2.1.8. Importancia Económica.

Aunque el Grupo Excelsior no es tan conocido por sus recursos minerales como otras formaciones andinas, su estudio es fundamental para la comprensión de la evolución geológica de los Andes y para la exploración de recursos naturales en la región, (Newell, 1945).

4.2.1.9. Estratigrafía Local Grupo Excelsior.

En el ámbito de la Cordillera Occidental del centro del país en la zona de San Cristóbal -Carahuacra (Figura 18), la unidad más antigua está representada por el Grupo Excelsior, las unidades geológicas del triásico, jurásico y cretácico tienen poco espesor en algunos casos no se ha separado en Formaciones, quedando como Grupos por encontrarnos al borde de cuenca o un alto estructural preexistente.

Los principales afloramientos del Grupo Excelsior se ubican en el anticlinal de Chumpe situado en la quebrada del mismo nombre. Se constituye en su base por de filitas carbonosas gris oscuras friables, en la parte media se tiene metavolcánicos afaníticos gris verdosos, seguidamente se tiene mármol color gris blanquecino y en la parte superior hay filitas grises a gris verdosas. Por sus relaciones de contacto se le atribuye una edad Devónica.

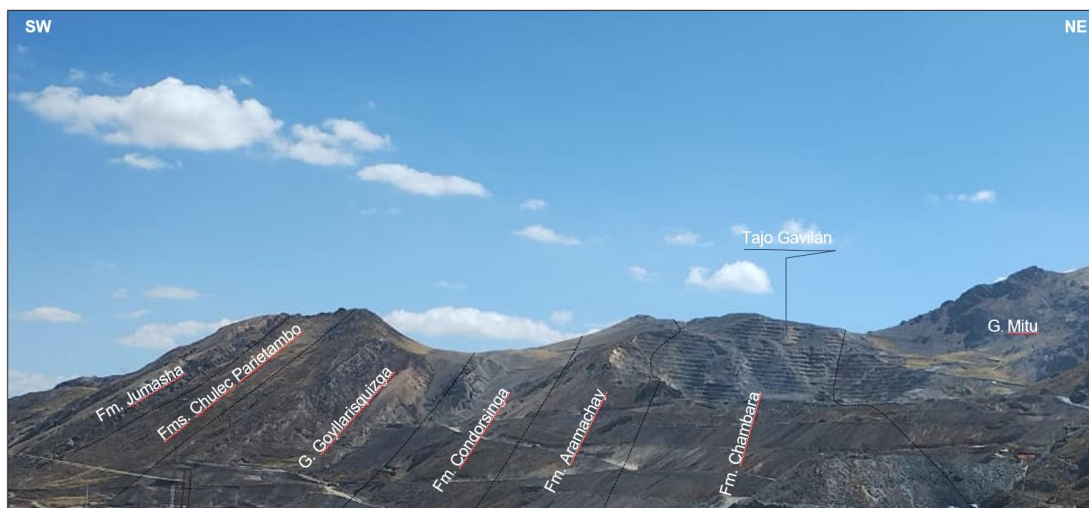


Figura 15. Unidades litoestratigráficas presentes en San Cristóbal – Carahuacra.

La zona de fallas denominadas Angelas, en este sector se tiene la presencia de cuatro fallas, es una zona en la cual se ha dado una mayor deformación donde tenemos la presencia de esquistos cuarzo sericita, estas fallas representan el límite en San Cristobal - Carahuacra, al norte de estas fallas, las vetas que se minan subterráneamente, en superficie solo aparecen como trazas de falla, mientras que al sur de las fallas anteriormente mencionadas las vetas afloran en superficie.

En los esquistos macroscópicamente se reconoce una textura granolepidoblástica. Está compuesta por blastos de cuarzo I y muscovita soportado en una matriz de sericita y cuarzo II, estos generalmente se muestran en bandas de agregados granoblásticos de cuarzo II, intercalados con bandas lepidoblástica de sericita. Además, se tiene presencia de minerales accesorios como rutilo, turmalina y zircón. Presenta un evento de forma penetrativa y en venillas rellena por carbonatos asociado con minerales opacos (Figura 16). Microscópicamente presenta textura granolepidoblástica. Está compuesta por blastos de cuarzo I y muscovita soportado en una matriz de sericita y cuarzo II, estos generalmente se muestran en bandas de agregados granoblásticos de cuarzo II, intercalados con bandas lepidoblástica de sericita. Además, se tiene presencia de minerales accesorios como rutilo, turmalina y zircón. Presenta un evento de

forma penetrativa y en venillas rellena por carbonatos asociado con minerales opacos (Figura 17).

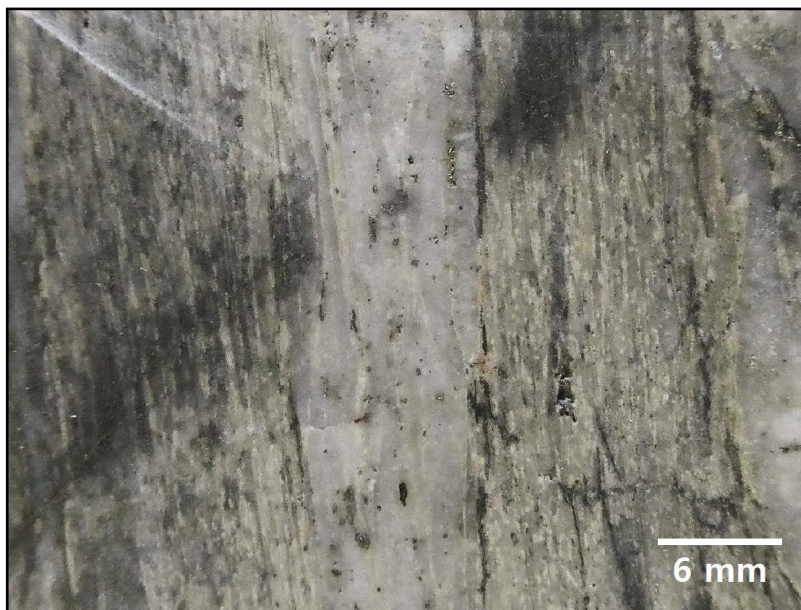


Figura 16. Esquisto de cuarzo – sericita

4.2.2. Grupo Mitu.

Definido como Grupo Mitu por McLaughlin (1925), a una secuencia de areniscas rojas y conglomerados arenosos con coladas volcánicas y piroclásticos rojos.

El Grupo Mitu es una unidad geológica importante en el Perú, principalmente expuesta en la región central y sur del país. A continuación, se presenta información científica sobre sus principales características.

4.2.2.1. Génesis.

*El Grupo Mitu se formó durante el *Pérmico tardío al Triásico temprano* (hace aproximadamente 260-240 millones de años). Este grupo está asociado a un contexto geodinámico de rifting (extensión cortical) relacionado con la desintegración del supercontinente Pangea, (Panca y Breitzkreuz, 2010). Durante este período, hubo una intensa actividad magmática y tectónica, lo que resultó en la formación de rocas ígneas y sedimentarias.*

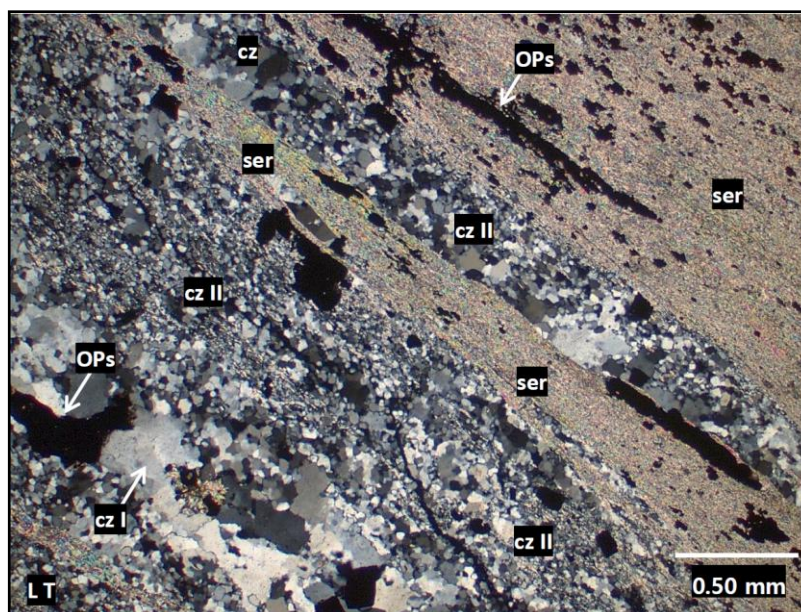


Figura 17. Microfotografía, Textura granolepidoblástica compuesta por blastos de cuarzo I (cz I), presente en intercalaciones de bandas de cuarzo II (cz II) y bandas de sericita (ser). Presencia de minerales opacos (OPs). Fotomicrografía en LT-NX.

- Ambiente de formación: El Grupo Mitu se depositó en un ambiente continental, caracterizado por cuencas extensionales con actividad volcánica y sedimentación fluvial y lacustre.

- Magmatismo: Está asociado con el magmatismo de arco relacionado con la subducción de la placa oceánica bajo el margen occidental de Gondwana.

ERA	Periodo	Formación	Columna	Descripción Litológica	Mineralización
MESOZOICO	Cretaceo	Formación Jumasha		Calizas grises y gris amarillentas en estratos medianos a gruesos.	?
		Formación Parietambo		Calizas y margas color gris negruzco.	?
		Formaciones Inca Chulec		Calizas y margas color gris amarillento.	?
		Grupo Goyllarisquiza		Areniscas cuarzosas blanquecinas, calizas, limolitas y areniscas rojizas.	?
	Jurásico	Formación Condorsinga		Calizas mudstone y wackstone.	Vetas Mantos
		Formación Aramachay		Calizas mudstone y wackstone con presencia de nódulos silíceos.	
	Triásico	Formación Chabara		Mantos polimetálicos (Zn, Ag, Pb, Cu). Dolomias, Calizas Packstone y greistone.	Vetas
		G. Mitu		Tobas líticas verdosas. Volcanosedimentarios color gris rojizo.	
	Pérmico			Tobas de cristales, constituida por fragmentos de plagioclasas, cuarzo. Vetas polimetálicas (Zn, Ag, Pb, Cu). Lavas de composición andesítica.	Vetas
	Devónico	G. Excelsior		Filitas grises y gris verdosas. Mármol color gris blanquecino. Metavolcánicos afaníticos gris verdosos. Cuerpos polimetálicos (Zn, Ag, Pb, Cu). Filitas carbonosas gris oscuras friables.	Vetas Cuerpos

Figura 18. Columna estratigráfica de San Cristóbal y Carahuacra.

4.2.2.2. Afloramientos

Los afloramientos del Grupo Mitu son prominentes en varias localidades del Perú, especialmente en amplias zonas de las siguientes regiones:

- Departamento de Ayacucho*: En la zona de Huancapi y Víctor Fajardo.
- Departamento de Cusco*: En la región de Quillabamba y La Convención.
- Departamento de Puno*: En la zona de San Gabán y Macusani.
- Departamento de Junín*: En la región de Satipo.

Estos afloramientos son clave para entender la evolución geológica del sur y centro del Perú durante el Pérmico-Triásico.

El Grupo Mitu está compuesto por una secuencia de rocas ígneas y sedimentarias, que incluyen:

- Rocas volcánicas: Basaltos, andesitas y riolitas, que representan la actividad magmática asociada al rifting, (Panca y Breitzkreuz, 2010).
- Rocas sedimentarias: Conglomerados, areniscas y lutitas, depositadas en ambientes fluviales y lacustres.
- Intercalaciones: En algunas zonas, se observan intercalaciones de capas volcánicas y sedimentarias, lo que indica una alternancia entre períodos de actividad magmática y sedimentación.

La estratigrafía del Grupo Mitu se divide en dos formaciones principales:

1. Formación Mitu inferior: Dominada por rocas volcánicas (basaltos y andesitas).
2. Formación Mitu superior: Conformado esencialmente por sedimentos clásticos gruesos (conglomerados) e intermedios (areniscas).

4.2.2.3. Importancia geológica.

- Contexto tectónico: El Grupo Mitu representa la evolución tectónica del margen occidental de Gondwana durante el periodo Pérmico-Triásico.

- Mineralización: Por sectores las litologías del Grupo Mitu se asocian con sistemas mineralizados polimetálicas de cobre y oro.

- Paleogeografía: Mediante la conformación geográfica pasada, proporcionan información sobre los ambientes sedimentarios continentales y la actividad magmática durante el proceso de la ruptura de Pangea.

4.2.2.4. Relación con otras unidades geológicas.

El Grupo Mitu está en contacto discordante con unidades más antiguas (como el Grupo Copacabana del Carbonífero-Pérmico) y es cubierto de manera discordante por sedimentos del Mesozoico (como el Grupo Pucará del Triásico-Jurásico).

4.2.2.5. Investigaciones recientes.

Estudios recientes han utilizado dataciones radiométricas (U-Pb en circones) para precisar la edad del magmatismo del Grupo Mitu, confirmando su relación con el rifting del Pérmico-Triásico. Además, se han realizado estudios geoquímicos para entender el origen del magmatismo y su relación con la subducción de la placa oceánica.

4.2.2.6. Geología Local Grupo Mitu.

Rocas volcánicas del Grupo Mitu afloran en ambos flacos del anticlinal de Chumpe, se constituye en su base por rocas lávicas de composición andesítica, seguidamente se tiene tobas de cristales, suprayaciendo tenemos la presencia de volcanos sedimentarios y en la parte superior de este grupo se

ha notado la presencia de tobas líticas volcánicas color gris rojizo gris a gris verdoso con clastos sub angulosos con tamaños de 1 a 20 cm. Por sus relaciones estratigráficas se le atribuye una edad Pérmico -Triásica (Figura 18).

4.2.3. Grupo Pucará

McLaughlin (1925) describió a una secuencia de calizas de color gris claras que denomino como Grupo Pucará. Posteriormente Mégard (1968) subdividió en tres unidades: Chambará, Aramachay y Condorsinga. El Grupo Pucará constituye un conjunto de secuencias sedimentarias y volcanoclásticas que se localizan principalmente en el centro y sur del Perú, abarcando un intervalo temporal que va desde el Pérmico al Triásico. Su estudio es fundamental para entender la historia geológica de la región andina y las condiciones ambientales en las que se formaron esta diversidad de secuencias.

4.2.3.1. Génesis y ambiente de sedimentación

a)Contexto geológico: Durante el Pérmico - Triásico, el área que hoy ocupa el Perú se encontraba en un contexto tectónico diferente, donde la Pangea comenzaba a fragmentarse. Esto influyó en los patrones de sedimentación y en la configuración de cuencas.

b)Ambientes de sedimentación: El Grupo Pucará se forma en ambientes sedimentarios variados, que incluyen:

- Ambientes marinos: Las rocas del Grupo Pucará incluyen secuencias que sugieren un ambiente marino, como plataformas carbonatadas y depósitos de grava. Esto indica la presencia de un mar que cubría la región, lo que facilitó la sedimentación de carbonatos y otros sedimentos marinos.

- Ambientes lacustres y fluviales: También se han identificado depósitos que sugieren la existencia de lagos y ríos, lo que indica la influencia de sistemas fluviales y

lacustres en la sedimentación. El desarrollo de estos ambientes sedimentarios puede considerarse dentro de un contexto evolutivo dentro de una cuenca, la fisionomía de la cuenca está determinado principalmente por los sistemas de drenaje, así como por las condiciones climáticas que juegan un papel crucial.

c)Sedimentos: Los sedimentos que constituyen el Grupo Pucará, están conformados por arena, limo, arcilla, carbonatos y secuencias asociados a eventos volcaniclásticos. Estos materiales se sedimentaron en diferentes sucesiones que indican cambios en el nivel del mar, en los procesos tectónicos y las condiciones climáticas. Las diversas facies sedimentarias, indican diversos procesos de ciclos de transgresión y regresión marina. Los sedimentos de naturaleza volcaniclásticos registran diversos procesos volcánicos.

4.2.3.2. Mineralización

a)Minerales presentes: El Grupo Pucará representan franjas metalotéticas a lo largo del territorio peruano. Presentan una gran variedad de mineralización en metales bases y elementos no metálicos. La composición química primordial es el carbonato, que contiene minerales como la calcita y la dolomita, así como también depósitos de minerales de metales base zinc, plomo, plata y cobre.

b)Proceso de mineralización: La mineralización del Grupo Pucará se relaciona a diferentes eventos hidrotermales, originados durante distintas etapas tectónicas posteriores. El desarrollo de diversos sistemas de fallas y plegamientos en las diversas regiones, posibilitó las diversas migraciones de fluidos mineralizados. La naturaleza de los fluidos podría haberse originado en zonas profundas y se habrían removilizado a través de las rocas por diversas fracturas polidireccionales y porosidades, precipitando los diversos sistemas mineralizados en condiciones óptimas al encontrar catalizadores para su precipitación.

c) Factores que influyen en la mineralización: La mineralización está íntimamente relacionada con las condiciones sedimentarias y tectónicas. Factores como la temperatura, la presión, la composición química de los fluidos y la interacción con las rocas circundantes son determinantes en la formación de depósitos minerales. Además, las zonas de falla y los sistemas de fracturas actúan como vías preferenciales para la circulación de estos fluidos.

Los mantos de las minas San Cristóbal - Carahuacra, se desarrollan en la Formación Chambará, la cual presenta espesores entre un rango entre 95 a 115 metros, las rocas que constituyen esta formación son calizas packstone, greinstone y dolomías; las soluciones mineralizantes al entrar en contacto con los carbonatos de la Formación Chambará precipitan y forman cuerpos o vetas, la razón es la composición granulométrica gruesa, su porosidad y la composición química (Tabla 6), los diversos estudios en la parte lito geoquímica desarrollados en la parte central del Perú, revelan que las calizas de la Formación Chambará presentan un alto contenido de CaO: 30-48% y MgO: 4-17%, la SiO₂ llega a 12 % y Al₂O₃ llega a un 2%. La Formación Aramachay por su parte presenta calizas mudstone y wackstone con abundantes nódulos silicios, sus contenidos de CaO están entre 1-28% y la SiO₂ llega hasta 77% haciendo que estas calizas sean poco reactivas y habrían servido como rocas sello para los fluidos mineralizantes de edad Miocénica, (Rosas et al., 2016).

Finalmente cabe señalar que la mineralización tipo manto esta hospedada en la Formación Chambará, tiene una orientación NW-SE con buzamientos al 45 a 50°SW, el control estructural de estos mantos asociado a vetas del tercer evento estructural, ya que este conduce las soluciones hidrotermales hacia las calizas del Pucara.

4.2.3.3. Grupo Pucara - Geología Local

En la base del Grupo Pucará afloran dolomías, calizas packstone y grainstone correspondientes a la Formación Chambará, seguidamente

tenemos calizas mudstone y wackstone con nódulos silicios correspondientes a la Formación Aramachay, finalmente se tiene calizas mudstone y wackstone correspondiente a la Formación Condorsinga (Figuras 19 y 20).

Tabla 6. Composición promedio (análisis por FRX-roca total) de las formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga en las columnas estudiadas en el centro de Perú, modificado de (Rosas y Fontboté, 1994).

Unit	Chambará					Aramachay					Condorsinga					
Section	Tingocancha	Malpaso	Tarma	Shalipayco	San Vicente	Tingocancha		Malpaso		Tarma	Shalipayco	San Vicente	Tingocancha	Malpaso	Tarma	San Vicente
						l.p.	u.p.	l.p.	u.p.							
n	13	32	6	34	75	12	11	6	6	1	1	5	13	16	1	1
n*	3	3	6	34	75	3	2	2	3	1	1	5	3	3	1	1
%																
CaO	30.70	32.01	47.94	34.01	32.75	17.46	23.26	9.38	24.32	0.89	15.68	28.28	39.93	49.84	0.36	29.00
MgO	17.03	13.68	4.17	16.08	16.36	10.58	12.67	4.74	14.95	0.59	0.92	1.77	8.67	2.63	0.24	19.30
SiO ₂	7.94	12.04	4.78	4.84	3.67	36.17	21.95	61.45	20.44	77.30	48.28	35.56	7.92	3.79	96.50	9.10
Al ₂ O ₃	0.76	1.34	0.35	0.40	0.82	6.83	4.76	6.70	2.78	8.92	6.43	4.32	0.88	0.59	1.30	0.73
Fe ₂ O ₃	0.83	0.64	0.27	2.17	1.41	1.24	2.31	1.58	1.25	3.71	3.79	2.53	0.57	0.47	0.75	1.09
LOI	42.88	39.65	42.33	40.72	43.78	27.58	33.60	14.38	35.60	3.36	19.06	24.78	40.97	41.86	1.13	39.40

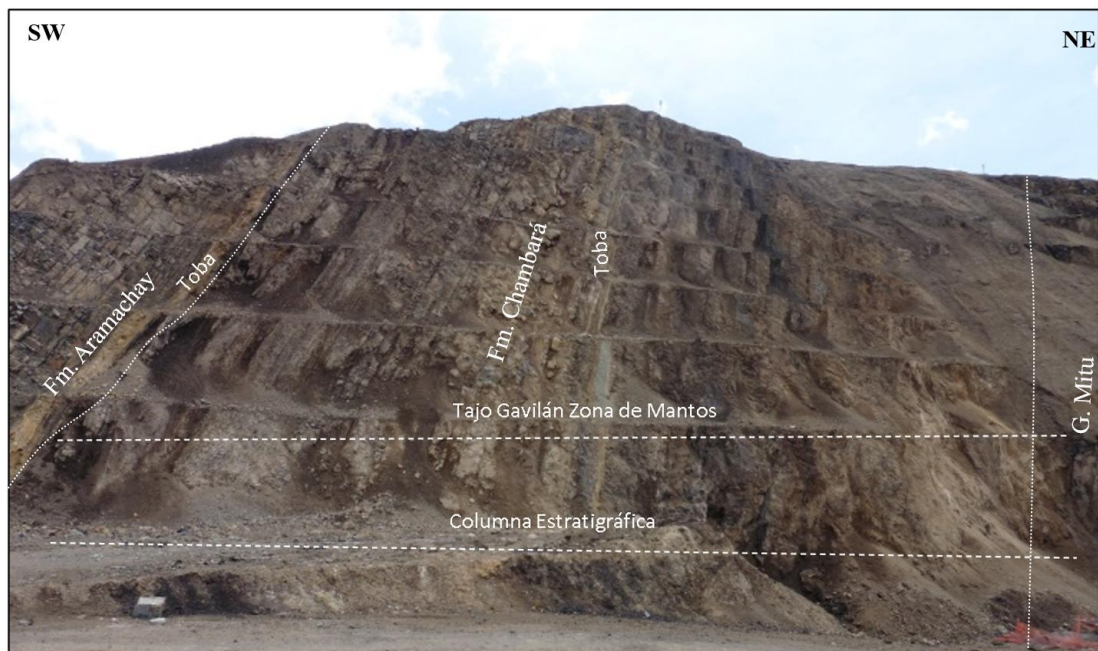


Figura 19. Tajo Gavilán lugar donde se realizó la columna estratigráfica.

4.2.4. Unidades Cretáceas

En el cretáceo se tiene areniscas cuarzosas, limolitas y calizas del Grupo Goyllarizquizga, seguidamente tenemos calizas y margas color gris amarillento de las Formaciones Inca Chulec, continuando con rocas más

jóvenes se tiene calizas y margas bituminosas de color gris negruzco de la Formación Pariambo; por último, tenemos calizas grises y gris amarillentas, estratificadas en capas medianas y gruesas de la Formación Jumasha (Figura 15).

4.2.5. Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas en la zona están representadas por cuarzo monzonitas, dacitas y porfido dacítico que cortan litologías de los grupos Excelsior, Mitu y Pucara.

4.2.5.1. Intrusivo Ácidos.

Las rocas intrusivas ácidas están representadas por cuerpos subvolcánicos y diques de composición dacítica principalmente están ubicados a lo largo o cerca de la zona axial del anticlinal de Chumpe.

Los stocks de composición pórfido dacítico más importantes en el área están representado por los intrusivos Carahuacra de 850 x 1500 metros (Figura 21), San Cristóbal de 450 x 650 metros y el intrusivo Chumpe de 150 x 500 metros, que se emplazan en los grupos Excelsior, Mitu y Pucara.

Macroscópicamente el pórfido dacítico presenta las siguientes características, es color gris con tonalidades pardas y blanquecinas. Presenta una textura porfirítica. Compuesta por cristales de plagioclasas, biotita y cuarzo primario, soportados en una matriz de afanítica. Presenta un evento de alteración dada por agregados de biotita potásica, además es cortada por venillas del feldespatos secundario, venillas de cuarzo y venillas de carbonatos. La roca presenta una dureza moderada a alta y densidad alta. Presenta un tenue magnetismo y muestra efervescencia al contacto con el ácido clorhídrico, (Figura 22).

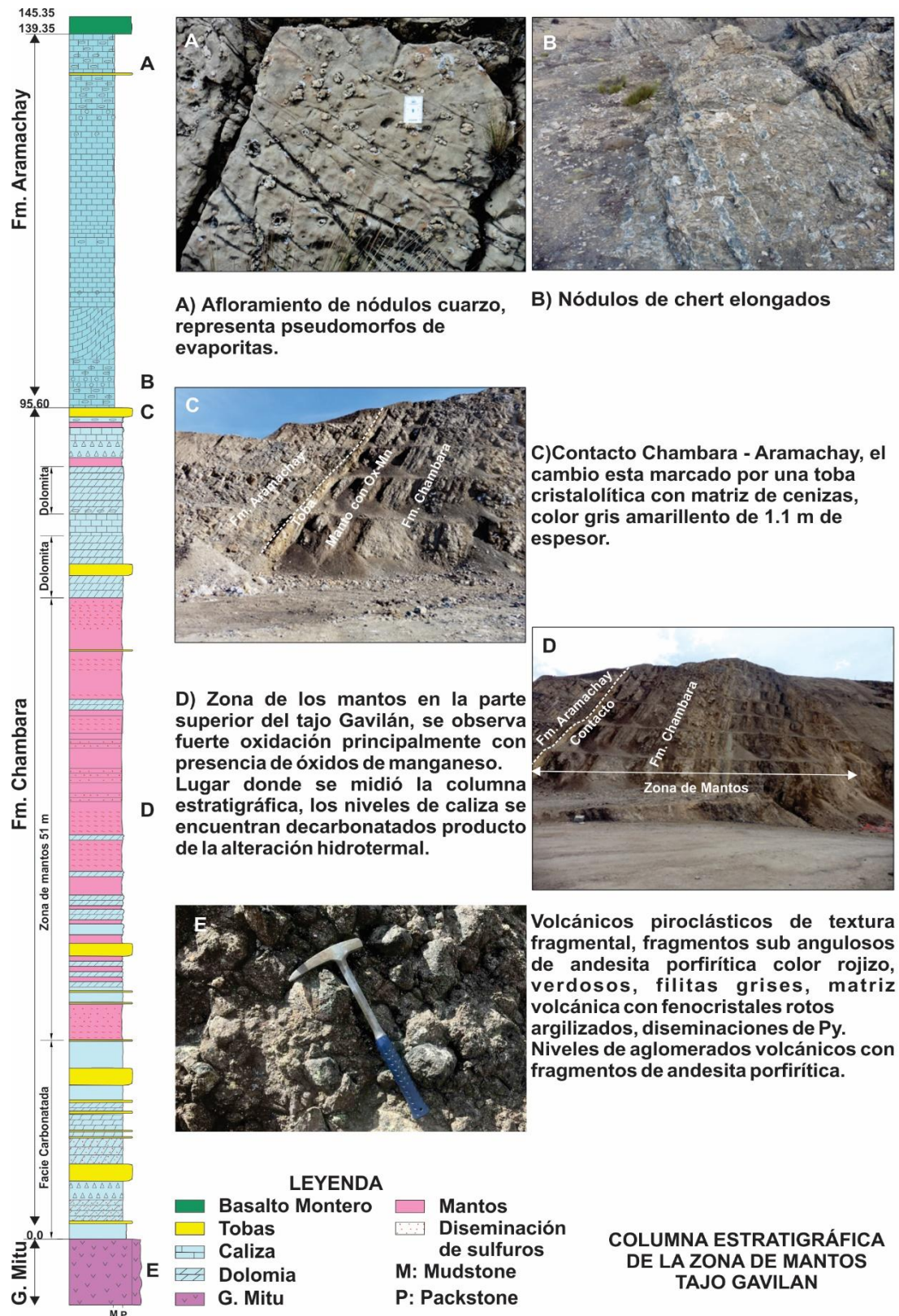


Figura 20: Columna Estratigráfica del Grupo Pucara.

Microscópicamente, presenta textura porfírica, está compuesta por fenocristales de moldes de minerales ferromagnesianos, plagioclasas, biotita y cuarzo primarios, soportados en una matriz de textura microcristalina fina, conformada por cuarzo II-feldespatos II.

Presencia de minerales accesorios como rutilo y apatito. Presenta un primer evento de alteración dado por agregados de biotita secundaria. Un segundo evento de venillas y agregados de cuarzo III – feldespato secundario. Seguido de un evento penetrativo masivo de agregados de cuarzo IV asociado con cloritas, moscovita, carbonatos I, óxidos de titanio y minerales opacos. Un penúltimo evento de venillas estériles de cuarzo V. Un último evento de venillas rellenas por carbonatos asociado con minerales opacos II. Además, también se muestra agregado de esmectita alterando a los agregados de sericita y moscovita en feldespatos, (Figura 23).

Los stocks han sido datados por (Bartlett, 1984; Beuchat, 2003), tienen las siguientes edades: Carahuacra al norte (43.5 ± 1.6 Ma) K-Ar y Chumpe al sur ($6.6 \text{ Ma} +1/-3.6$) U-Pb.

4.2.5.2. Intrusivo Básicos.

Los cuerpos intrusivos de composición máfica han sido identificados como pequeñas apófisis en la región de Carahuacra. Se ha cartografiado una serie de diques de diabasa con orientación predominantemente perpendicular al eje del anticlinal de Chumpe, situándose estos al norte del intrusivo de Carahuacra. En la zona de Andaychagua, se registra la presencia de cuerpos gabroides de morfología elipsoidal, con dimensiones aproximadas de 180 x 270 metros. Estas intrusiones máficas afloran en la carretera que conecta Andaychagua con la localidad de Ultimátum, evidenciando una compleja historia de emplazamiento magmático en el contexto tectónico de la región".

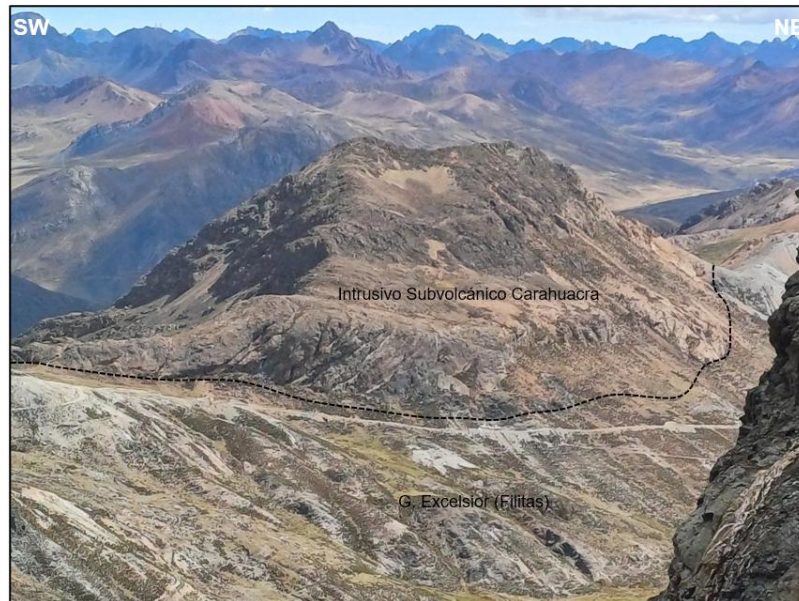


Figura 21. Subvolcánico Carahuacra cortando secuencias metamórficas del Grupo Excelsior

Macroscópicamente es una roca fanerítica con cristales visibles a simple vista. Presenta una estructura homogénea y holocristalina, su color varía entre un gris oscuro a negro. Mineralógicamente está compuesto predominantemente por plagioclasas y minerales máficos observando a piroxenos, hornblenda y biotita.

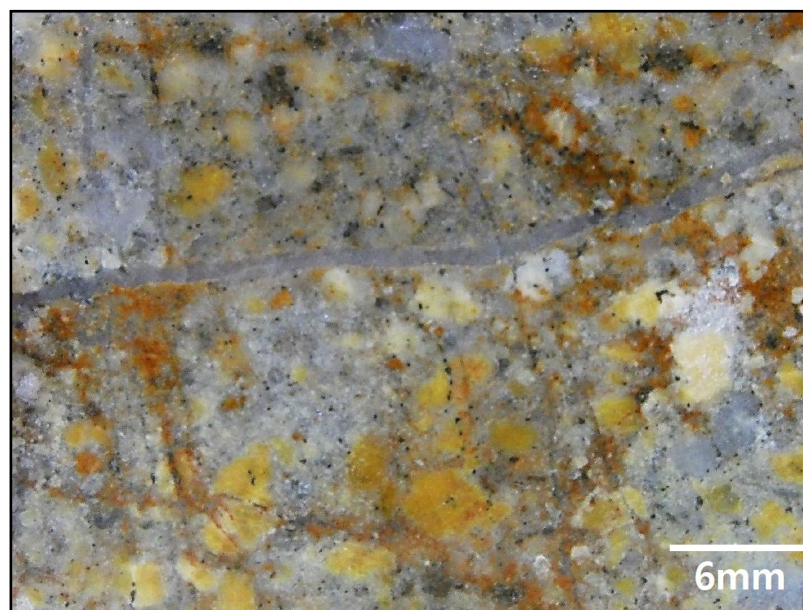


Figura 22. Intrusivos subvolcánicos pórfido dacítico

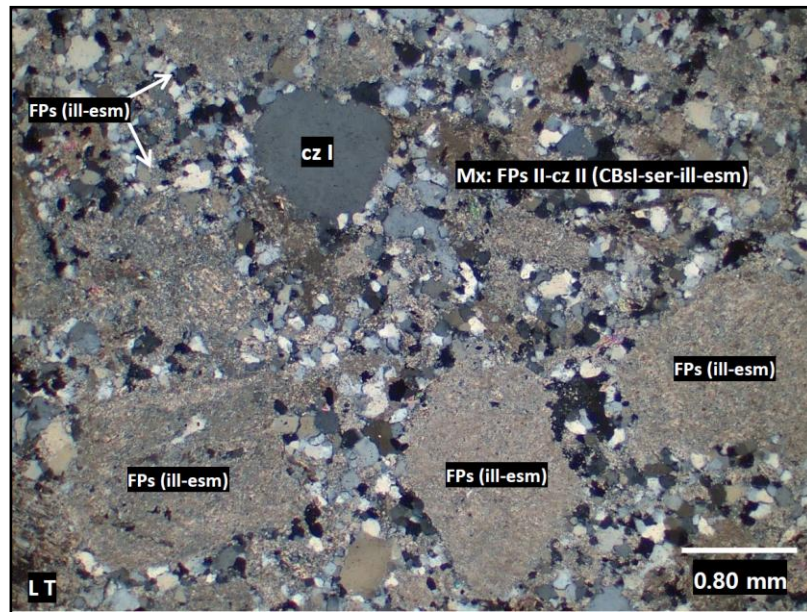


Figura 23. Microfotografía, textura porfírica, compuesta por fenocristales de feldespatos I (FPs I) soportados en una matriz de cuarzo II-feldespatos II (cz II-FPs II) alteados por carbonatos I-sericita-illita-esmectitas (CBs I-ser-ill-esm).

Fotomicrografía en LT-NX.

CAPÍTULO V: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área minera de San Cristóbal - Carahuacra se encuentra ubicada en el distrito de Yauli, provincia y departamento de Junín. El basamento está constituido por rocas metamórficas correspondientes al Grupo Excelsior de edad Devónica; litológicamente representadas de la base al tope por filitas carbonosas gris oscuras friables, gradando hacia la parte media por metavolcánicos afaníticos de tonos gris verdosos con intercalaciones de volcaniclásticos, seguidamente se tiene mármoles, de color gris blanquecino, suprayaciendo se encuentran filitas de tonos grises a gris verdosas, correspondiendo al núcleo del anticlinal de Chumpe. En discordancia se depositaron secuencias continentales asignado al Grupo Mitu, compuesto por rocas lávicas de composición andesítica en su base, seguido de tobas de cristales, volcansedimentarios y aglomerados de tonalidades gris rojizas; finalmente se tiene tobas líticas de color gris verdoso. Sobreyacen secuencias marinas compuestas por dolomías, calizas packstone y greinstone correspondientes a la Formación Chambará, seguida de calizas mudstone y wackstone con nódulos silicios correspondientes a la Formación Aramachay, finalmente se tiene calizas mudstone y wackstone representado por la Formación Condorsinga. Secuencias asignadas al cretáceo inferior sobreyacen al Grupo Pucara representado por el Grupo Goyllarisquizga y las formaciones de ambientes calcáreos que son asignadas a las formaciones Chulec, Pariatambo y Jumasha (Figura 15).

Unidades ígneas como el intrusivo Carahuacra (43.5 ± 1.6 Ma) K-Ar y Chumpe ($6.6 \pm 1/-3.6$ Ma) U-Pb se observan en la zona de estudio, fueron datados por (Bartlett, 1984; Beuchat, 2003), éstos intruyen a las secuencias de los grupos Excelsior, Mitu y Pucara. Plutones como San Cristobal y otros menores se observan en el área de manera muy dispersa como diques de dirección NW-SE y apófisis que son cortados por los sistemas vetiformes de tipo cordillerano con estadios A, B y C (Rottier et al., 2016), cuya edad de

mineralización oscila entre (4.78 - 4.90 Ma) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Beuchat, 2003). El estadio “A” se caracteriza por la presencia de calcopirita, esfalerita rica en Fe, hematita, magnetita, arsenopirita, casiterita, wolframita. El estadio “B” presenta pirita, cuarzo. Mientras que el Estadio “C” consiste de esfalerita pobre en Fe, galena, pirita $\pm$ pirrotita $\pm$ cobres grises, arsenopirita, sulfosales, bournonita, estefanita, acantita, oropimente, rejalgar, estibina y carbonatos.

5.1. Características estructurales de las vetas

En muchas oportunidades cuando encontramos un afloramiento de mineral, lo primero que pensamos es su continuidad vertical hacia las zonas inferiores, sin tomar en cuenta los indicadores cinemáticos de la falla que dan origen a zonas de cierre y apertura. El tomar información de la cinemática nos va a ayudar a predecir cuál es la posición del ore shoot, haciendo más efectivas nuestras campañas de perforación y/o programación de una labor minera.

Las vetas de relleno de fallas, típicamente tiene una distribución desigual, los ore shoots con altas leyes son semilineales separados por zonas de menor ley o segmentos de falla estériles. Por lo tanto, una campaña de perforación exitosa debe estar diseñada óptimamente para la intersección de los ore shoots con alta ley y no las zonas intermedias. Sin embargo, el diseño típico de sondajes de perforación para vetas de relleno de fallas, apunta a la veta directamente en dirección descendente desde los afloramientos de mayor ley, omitiendo la mayoría de los ore shoots que se inclinan menos de $\sim 80^\circ$ a 90° en la estructura. Los ore shoots se forman a lo largo de fallas de premineralización o sinmineralización en aberturas estructurales localizadas y alargadas perpendiculares al vector de deslizamiento. La inclinación de dichos ore shoots se puede predecir utilizando modelos de cinemática de falla controlada por estrés. Se presentan ecuaciones que utilizan datos de cinemática de fallas para diseñar sondajes de perforación para un éxito óptimo en la búsqueda de dichos canales de mineralización. Las ecuaciones calculan las coordenadas (UTM)

asociadas al objetivo de perforación, dada la orientación de la veta de relleno de falla, la inclinación del vector de deslizamiento (generalmente determinada a partir de líneas de deslizamiento), la profundidad vertical para intersectar el ore shoot y las coordenadas UTM de afloramientos geoquímicamente anómalos a lo largo de la veta de falla. Aunque el método supone que la cinemática de fallas controla la orientación ore shoot y no es aplicable a todos los ore shoots (como los que se forman en las intersecciones de fallas o zonas de cizallamiento con capas permeables, otras fallas o diques), el método aumenta la probabilidad de éxito de las pruebas de perforación de los ore shoots a través del diseño óptimo de los sondajes de perforación. (Nelson, 2006), (Figura 24).

Los conceptos señalados en el párrafo anterior han sido tomados en cuenta en el presente trabajo, asimismo se ha tenido en cuenta las restricciones mencionadas con la finalidad que los resultados sean óptimos y de aplicación.

Durante la campaña de campo se desarrolló diversos análisis en los sistemas de vetas que afloran en las minas San Cristóbal - Carahuacra. El mapeo geológico realizado al detalle tuvo como énfasis el desarrollo de la morfología de las diversas estructuras en superficie. Se tomaron datos cuantitativos como mediciones de azimuth y buzamiento, espesores reales y aparentes, en los diversos puntos de observación en campo (Anexo 2).

En los sistemas estructurales asociados a las vetas se pudo medir estrías de falla de los tres últimos sistemas estructurales determinados en el área de trabajo, con una población 20 datos por sistema, se pudo determinar la cinemática mediante estrías, fibras de crecimiento y estructuras Riedel tipo R y T. Los eventos estructurales en mención son de tendencia antiandina, cortan el plegamiento y fallamiento Andino considerado como primer evento. Para el procesamiento de información se usaron los softwares Stereonet, Faultkin y Win Tensor.

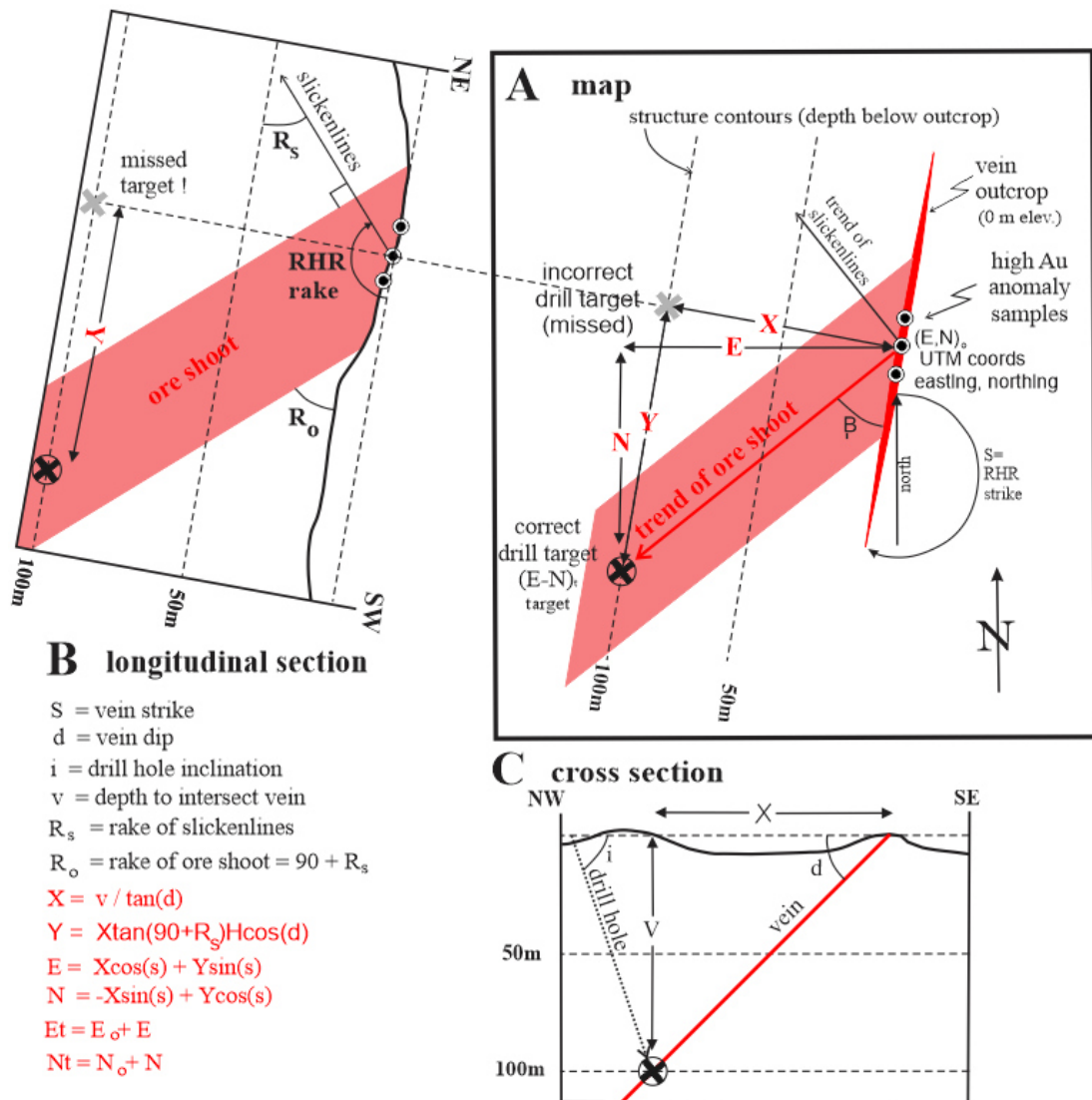
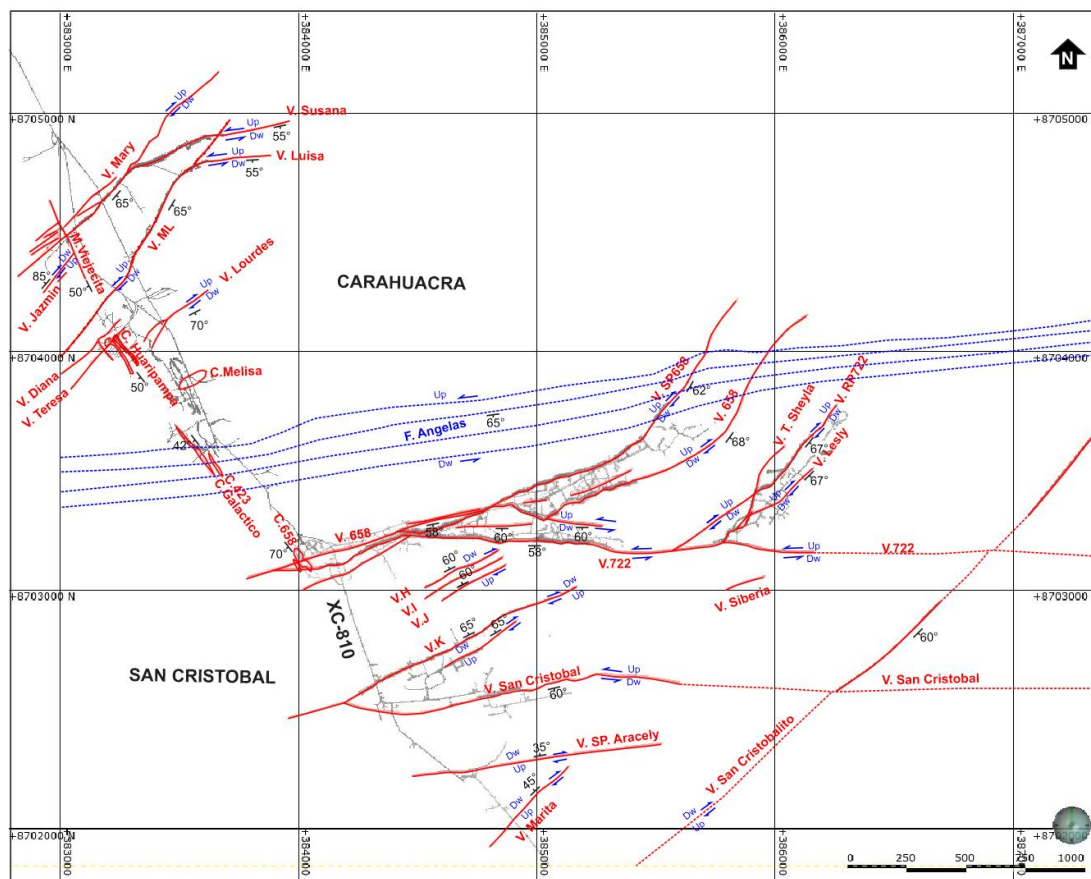


Figura 24. Correcta planificación de Sondajes y/o labor minera con la finalidad de encontrar nuevos recursos a partir evidencias de mineralización en superficie y teniendo en cuenta indicadores cinemáticos. Modificado de (Nelson, 2006).

Un corte al Nv 820 de las minas San Cristóbal - Carahuacra donde se aprecia cual es la distribución de vetas y mantos de los distintos eventos estructurales (Figura 25). Aquí se puede notar los mantos relacionados al primer evento estructural de dirección NW-SE, vetas del segundo evento estructural de rumbo N60° a 70°E con buzamientos al NW, el tercer evento de dirección N45°E y finalmente el cuarto evento con dirección N70°E a E-W

El azimut general son de tendencia antiandina N70°E, N45°E y sublatitudinal E-W, el buzamiento promedio es 70° a 78° NO, SE y S. Los sistemas de vetas se encuentran alojados en los sistemas de fallas, están conformados por diversos pulsos generados por eventos polifásicos.



- El primer evento está relacionado a estructuras NO-SE, ejemplo de ello tenemos al cuerpo Huaripampa, según observaciones del autor Bartlett (1984), este evento lo subdivide en tres estadios mineralógicos, el primero representado por especularita, cuarzo,

pirrotita y pirita; un segundo estadio de calcopirita, tetraedrita – tenantita, esfalerita, galena, pirargirita y polibasita; y un último estadio constituido por baritina, marcasita, plata nativa, covelita, hematitas y óxidos de manganeso. Sallier (2001) también considera tres estadios para el cuerpo Huaripampa, estadio 1, de Manganosiderita, hematita, magnetita, cuarzo, pirita, calcopirita, esfalerita y galena; un estadio 2, de manganosiderita, magnetita, cuarzo, pirita y esfalerita; el estadio 3, corresponde a calcita, baritina, óxidos de manganeso y plata nativa.

- El segundo evento estructural como estructura representativa en la mina San Cristóbal tenemos a veta K (Figura 30) con minerales de esfalerita, galena, pirita, cobres grises, sulfosales y carbonatos.

- El tercer evento estructural está relacionado a la veta San Cristóbal de dirección E-W donde inflexiona a N45°W es denominada veta San Cristobalito (Figura 26), ambas vetas eran consideradas como solo una, sin embargo corresponden a sistemas diferentes, solamente San Cristobalito corresponde al tercer evento, ambas vetas han sido estudiada por Pastor Figueroa (1970), demostrando tres estadios de mineralización, el primero consiste de pirita, wolframita y cuarzo; un segundo estadio de mineralización de cuarzo, calcopirita, marmatita, galena, tetraedrita y en menor proporción pirargirita, y un tercer y último estadio de mineralización representado por carbonatos con menor importancia esfalerita y marcasita.

- Relacionada al cuarto evento estructural tenemos la Veta 722 (Figura 26), la misma que fue caracterizada por Lisboa (2002), que lo describe como primer estadio a los minerales de pirita, wolframita, cuarzo calcopirita, arsenopirita, esfalerita, galena, estanita, freibergita, bismutina y pirargirita; en el segundo estadio se tiene cuarzo, arsenopirita, pirita calcopirita y esfalerita, finalmente se tiene cuarzo, carbonatos, baritina y sulfosales.

Las estrías de falla presentan distintos ángulos de pich, estas se agrupan dependiendo al sistema estructural que estén asociados. Para el segundo evento estructural se tiene un rumbo de N60 - 70°E con un pich de

24 - 30° al NE, el tercer evento estructural presenta un rumbo de N45°E con un pich de 37 - 45°SW; el cuarto sistema estructural de dirección E-O tiene un pich de 24 - 30°E.

Mediante el cartografiado geológico se pudo determinar la secuencia de eventos, una herramienta muy importante es el uso de la estratigrafía, la misma que da evidencias físicas del movimiento de las rocas en estudio, complementado con indicadores cinemáticos de las propias fallas se va a tener un resultado óptimo; asimismo cabe indicar el uso del softwares para determinar los paleo esfuerzos por el método de diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977; Angelier, 1984; Bott, 1959; Casas Sainz et al., 1990; Hippolyte et al., 2012) que dieron lugar a la generación de los distintos sistemas de falla.

5.2. Eventos estructurales mineralizantes

El estilo estructural en las zonas de San Cristóbal y Carahuacra exhibe diferencias significativas que pueden ser interpretadas en función de los procesos de apertura y cierre tectónico, los cuales han afectado a las unidades metamórficas, volcanoclásticas y sedimentarias del Grupo Excelsior (Paleozoico), Grupo Mitu (Triásico-Jurásico) y Grupo Pucará (Jurásico). Estos procesos han permitido establecer una cronología detallada de los eventos deformacionales que han controlado la evolución estructural y mineralógica de la región.

La sucesión de eventos en el área de estudio refleja un régimen tectónico complejo, caracterizado por múltiples pulsos compresivos y extensionales que han generado un sistema de fallamiento polifásico, brechamiento tectónico y reactivación de estructuras preexistentes. Durante estos eventos, se desarrollaron fracturas abiertas, zonas de cizalla y fallas inversas de alto y bajo ángulo, las cuales han actuado como trampas estructurales para la circulación de fluidos hidrotermales. Estos fluidos, ricos en metales base, precipitaron en condiciones específicas de temperatura y presión, generando ensambles mineralógicos y texturales característicos de cada etapa mineralizante.

El análisis estructural y mineralógico ha permitido establecer un modelo paragenético compuesto por una secuencia de cuatro eventos estructurales mineralizados. Cada uno de estos eventos se asocia a pulsos de deformación que han controlado la generación de brechas tectónicas, la reactivación de fracturas previas y la precipitación de minerales en espacios abiertos, definiendo así un patrón de mineralización que está condicionado tanto por la evolución tectónica regional como por la reología diferencial de las unidades litoestratigráficas involucradas (figura 26).

5.2.1. Primer evento estructural

El primer evento estructural se correlaciona con los procesos compresivos del ciclo orogénico Andino, impactando la evolución tectónica de la Cordillera Occidental. Este evento desencadenó un régimen de deformación predominantemente dúctil-frágil, donde los esfuerzos compresivos NW-SE generaron mecanismos de deformación variados según la litología y la reología de las unidades afectadas. En el Grupo Excelsior, compuesto principalmente por metasedimentos paleozoicos, la deformación se manifestó a través de pliegues asimétricos con flancos rectos y charnelas agudas y fallamiento inverso de alto ángulo, asociados a una reactivación de estructuras preexistentes. En general, la interacción entre los esfuerzos compresivos y la heterogeneidad litoestratigráfica del Grupo Excelsior resultó en la generación de un complejo sistema de estructuras deformacionales que controlan la actual geología de la región (Figura 26).

Es importante señalar que mediante el cartografiado geológico se ha podido evidenciar fallas del tipo inverso y normal (Figura 27), las fallas del tipo inverso se evidencian cuando las filitas del Grupo Excelsior se encuentran sobreyaciendo a rocas volcánicas del Grupo Mitu. Con referencia a fallas normales, en área de trabajo tenemos una falla que pone en contacto los grupos Mitu y Pucara, que se le conoce como “Falla Ticlio” en el ámbito de la operación minera, sin embargo, la falla con esta denominación se ubica al NW de laguna de Pomacocha según (Lepry, 1981), ver (Figura 13), la falla normal

en mención corresponde a la continuidad de la falla Yanama que no fue reconocida en su momento en la zona de San Cristóbal – Carahuacra.

5.2.2. Segundo evento estructural

De carácter antiandino, se asocia a un régimen tectónico transtensional vinculado a la evolución geodinámica postorogénica de la Cordillera Occidental. Este evento generó un sistema de fallamiento con orientación N60°-70°E y buzamientos de 70° - 78°NW, con un pitch promedio de 26°NE, la posición de los ores shoots asociados al σ_2 es de 60° al Oeste (Figura 28), indicando una deformación predominantemente frágil.

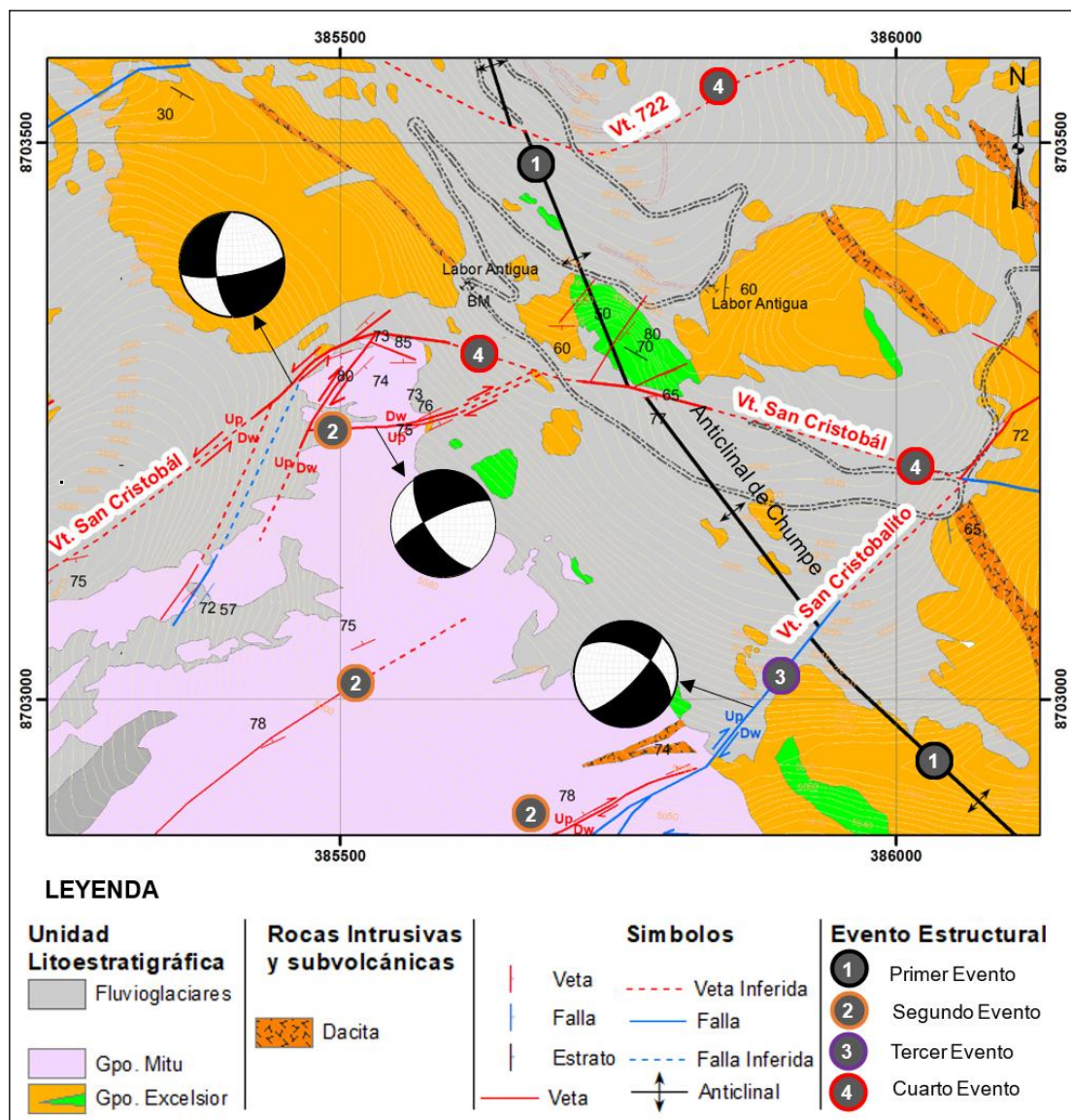


Figura 26. Plano Geológico mostrando cuatro eventos estructurales.

Dichas estructuras afectan a las unidades litoestratigráficas del Grupo Excelsior (metasedimentos paleozoicos de bajo a medio grado de metamorfización), el Grupo Mitu (secuencias volcanosedimentarias de edad Triásico-Jurásico) y el Grupo Pucará (carbonatos mesozoicos), evidenciando una respuesta mecánica diferencial en función de la reología de cada unidad (Figuras 26, 29).

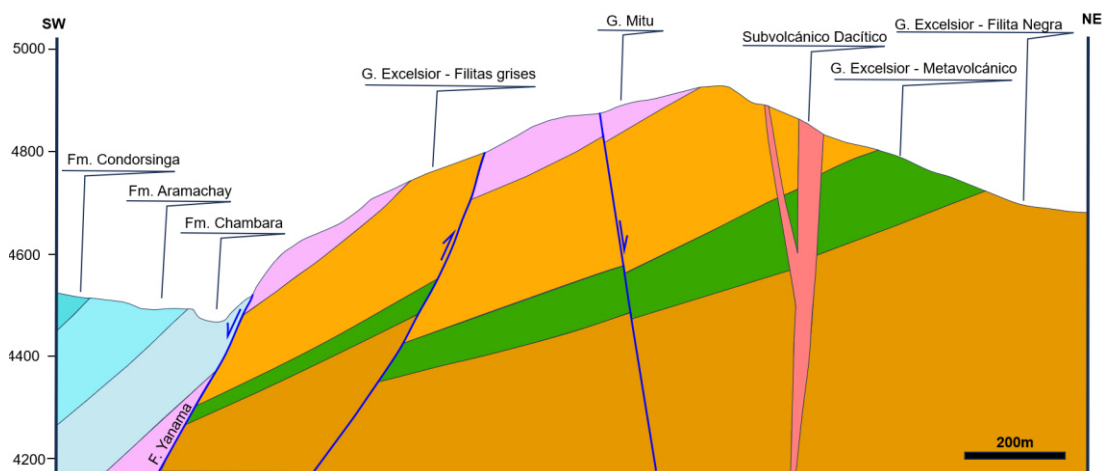


Figura 27. Sección transversal, mostrando fallamiento inverso y normal ocurrido en el primer evento estructural, estas fallas tienen una dirección NW-SE buzando al SW, flanco Este del anticlinal de Chumpe, zona de Huaripampa.

El análisis cinemático basado en estriaciones, desplazamientos relativos y criterios de deformación en afloramientos sugiere que estas fallas presentan un movimiento dextral-normal, característico de un régimen tectónico extensional con un componente transcurrente dominante. La interacción de estas estructuras con anisotropías preexistentes en las unidades afectadas propició la reactivación de zonas de debilidad heredadas de eventos compresivos previos, favoreciendo la nucleación de fallas secundarias y fracturas tensionales. Estas discontinuidades facilitaron la circulación de fluidos hidrotermales, lo que pudo haber generado zonas de alteración hidrotermal y mineralización asociada a sistemas de brechas tectónicas y fallas abiertas.

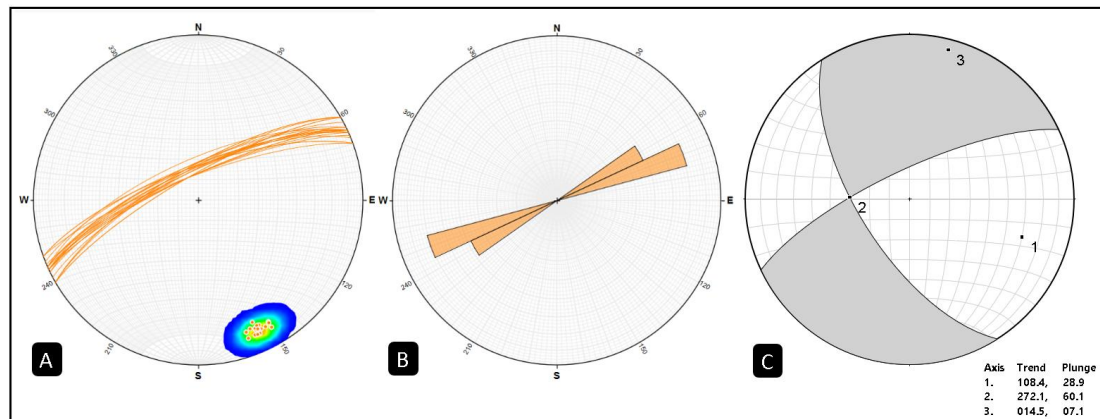


Figura 28. Segundo Evento Estructural. A.- Diagrama de polos, contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.

Este evento estructural no solo modificó la configuración geológica de la región, sino que también jugó un papel clave en la segmentación del basamento y en la evolución de la deformación en la Cordillera Occidental, controlando la geometría y disposición actual de las estructuras mayores en el área de estudio.

5.2.3. Tercer evento estructural

Se encuentra caracterizado por un sistema de fallas de orientación N45°E, con buzamientos de 70°SE y un pitch promedio de 42°SW, los ore shoots asociados al σ_2 tienen una inclinación de 45° al Noreste (Figura 31), reflejando un régimen tectónico transtensional de cinemática dextral-normal. Este evento afecta directamente a las unidades litoestratigráficas del Grupo Excelsior, compuesto por metasedimentos paleozoicos, y al Grupo Mitu, conformado por depósitos volcanosedimentarios del pérmico-triásico. La interacción de estos esfuerzos deformacionales con la anisotropía inherente a las rocas afectadas ha condicionado la geometría y distribución de las estructuras asociadas.



Figura 29. Fallas correspondientes al segundo y cuarto evento estructural, aquí se muestra además de las secuencias de eventos, su relación con la litología.

El análisis cinemático de estas fallas, basado en evidencias de estriaciones, escalones de falla y geometrías de pliegues asociados, indica una reactivación de estructuras preexistentes bajo un régimen de esfuerzos predominantemente extensional con un componente transcurrente dextral. Este proceso ha generado la apertura de corredores estructurales favorables para la migración de fluidos hidrotermales, lo que se refleja en la mineralización asociada a la veta San Cristobalito. La cartografía estructural de esta veta confirma una correlación directa entre la deformación registrada y la superposición de eventos tectónicos previos, evidenciando una relación evolutiva entre los pulsos de deformación y la mineralización en la región (Figuras 26, 32, 33 y 34).

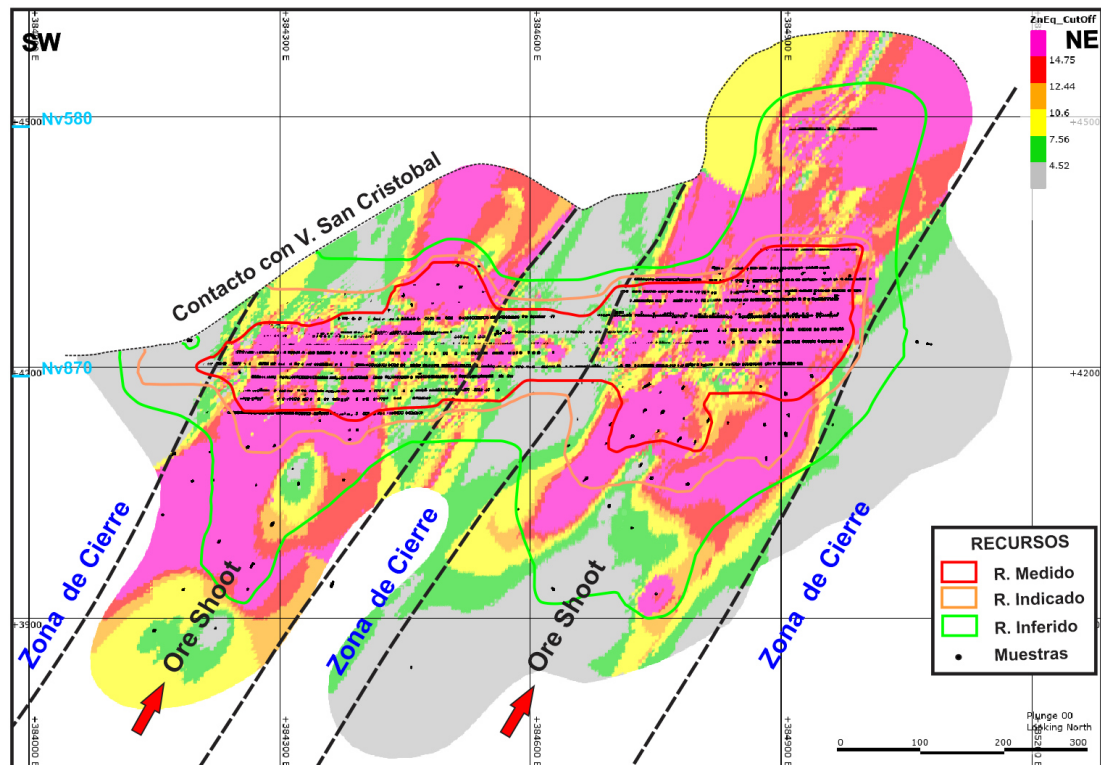


Figura 30. Modelo de bloques V.K. mostrando zonas de apertura y cierre, en esta estructura se puede apreciar zonas de apertura y cierre, también muestra el minado y sondeos realizados.

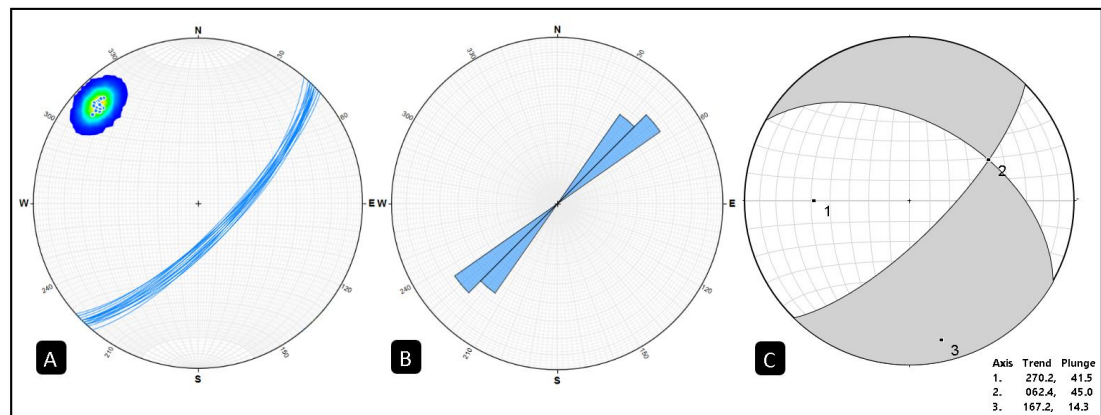


Figura 31. Tercer Evento Estructural. A.- Diagrama de polos y contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.

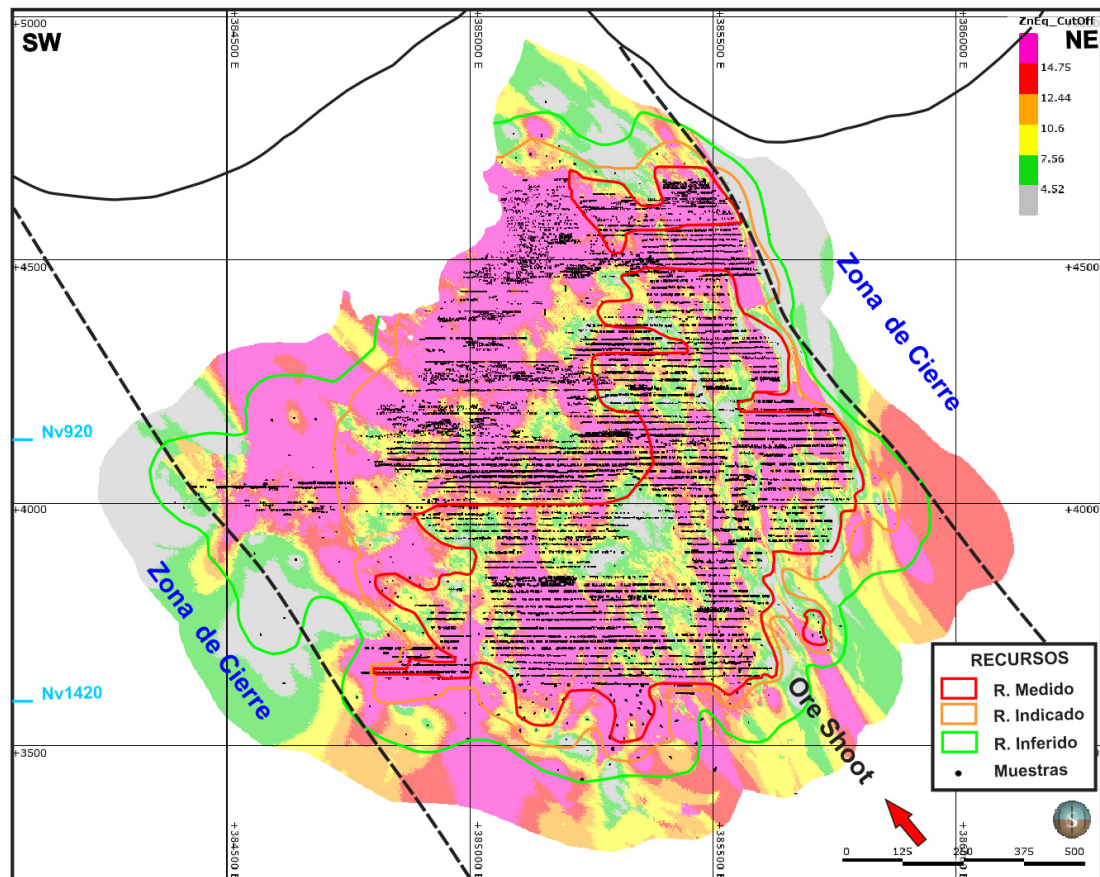


Figura 32. Veta Split 658, modelo de bloques representando el tercer evento estructural.

Este evento estructural no solo influyó la segmentación del basamento en la Cordillera Occidental, sino que también jugó un papel clave en la redistribución de esfuerzos y en la formación de zonas de cizalla que controlaron la geometría y continuidad de las estructuras mineralizadas dentro del sistema de fallamiento regional

La Veta San Cristobalito se ha reconocido por más de 3 km con ore shoots de 300 a 500 metros y zonas de cierre de las mismas dimensiones, en esta veta se encuentra el tajo de tungsteno. El tajo Oyama contiene mineralización de cobre y zinc (Figura 35).



Figura 33. Veta San Cristobalito, correspondiente al tercer evento estructural, cinemática dextral – normal, plunge 45° al Este.

Esta información es importante porque para este sistema en particular nos muestras las distancias de las zonas de apertura y cierre, lo cual nos apoya en la exploración. Asimismo, en la (Figura 37) se muestra que el salto de falla es de 90 metros. Para llegar a esta conclusión nos apoyamos en la estratigrafía medida a partir de sondajes diamantinos en la zona de Oyama.

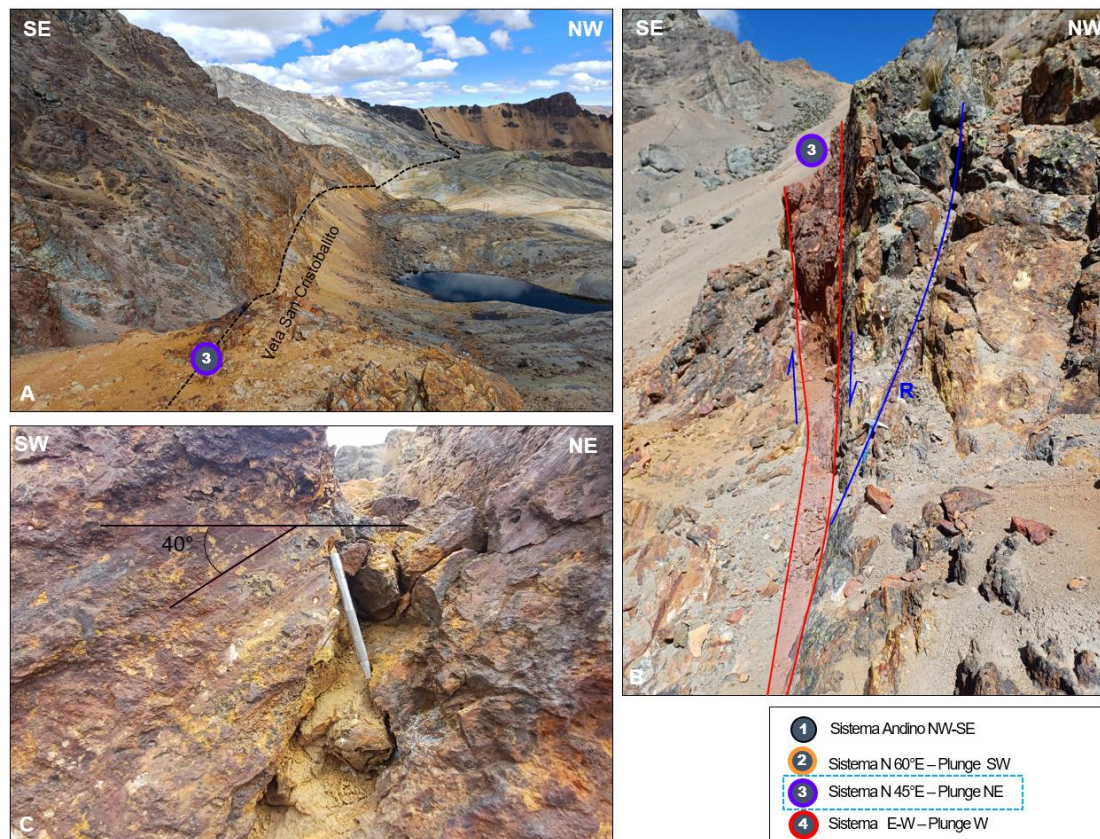


Figura 34. Veta San Cristobalito, correspondiente al tercer evento estructural, presenta una cinemática dextral – normal. A) Vista al suroeste, Veta San Cristobalito mostrando trayectoria en campo, B) Vista al suroeste, estructura tipo R en Veta San Cristobalito que ayuda a determinar su cinemática de movimiento C) Vista al noroeste, estría mostrando una cinemática dextral normal con pich de 40°.

El tercer evento estructural es muy importante en la formación de mantos para ello se debe cumplir las siguientes condiciones. Primero la posición de su ore shoot debe 45° NE hace que los fluidos hidrotermales lleguen al Grupo Pucará. Segundo, para que se formen los mantos tiene que estar presentes fluidos hidrotermales del Estadio “A” que dan lugar a la formación de mantos, estos son de mayor temperatura generalmente debajo de los 350°C. Tercero, la roca hospedante tiene que ser permeable y reactiva, en este caso el metalotecto lo constituye la Formación Chambará.

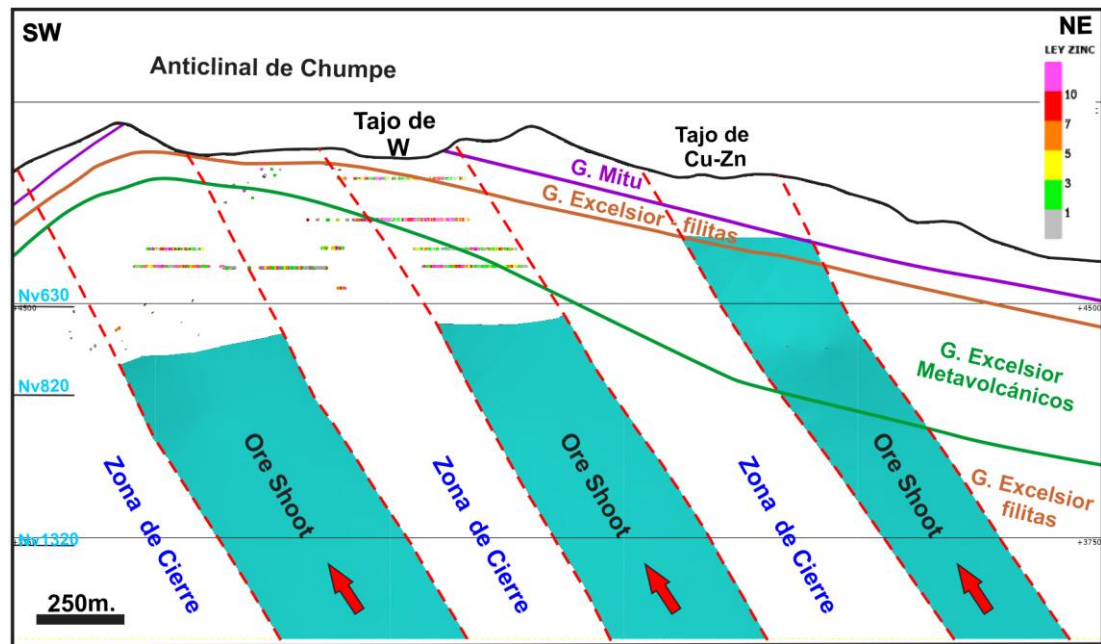


Figura 35. Veta San Cristobalito correspondiente al tercer evento estructural, la veta en mención tiene un recorrido de más 3 km con ore shoots de 300 a 500 metros y zonas de cierre de la misma dimensión.

En Cuarto lugar, es fundamental contar con un elemento que actúe como un sello impermeable, funcionando como una trampa para las soluciones hidrotermales, en este caso, las calizas con chert síliceo de la Formación Aramachay cumplen con esta función. Con todos estos elementos, se facilita la formación de mantos de Zn, Pb, Cu y Ag (Figura 36).

Otro sector del Grupo Pucara que da lugar a la formación de mantos es la interface de las Formaciones Aramachay – Condorsinga, donde se evidencia la mineralización tipo manto, los fluidos mineralizantes son atrapados por el basalto Montero que sirve como una barrera impermeable.

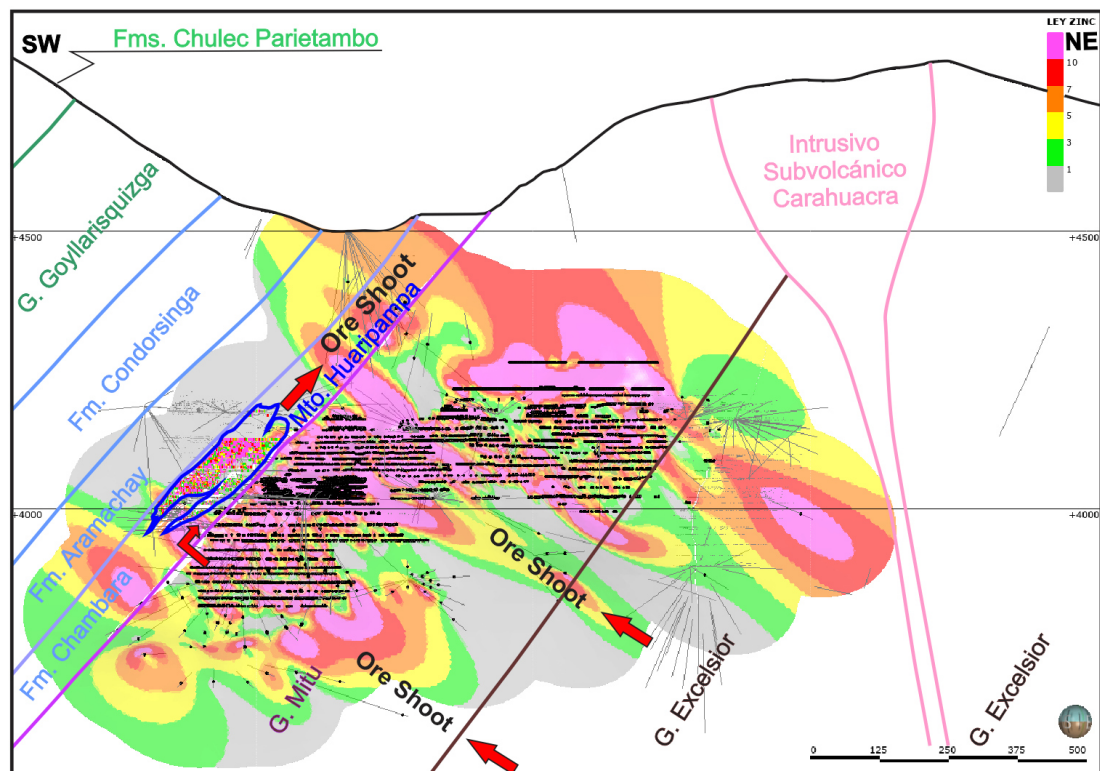


Figura 36. Veta ML mostrando leyes de Zn con su correspondiente posición del ore shoot, al llegar al horizonte permeable que lo constituye la Formación Chambará da lugar a la formación de mantos, cambiando la dirección de fluidos mineralizantes, este cambio está también condicionado por la Formación Aramachay que actúa como sello debido a su alto contenido de sílice.

5.2.4. Cuarto evento estructural

El cuarto evento estructural se caracteriza por un sistema de fallamiento con orientación predominantemente E-W a N70°E, presentando buzamientos promedio de 70°S y SE (Figura 38). La cinemática dominante en este evento corresponde a un régimen transtensional con movimiento sinistral-normal, evidenciado por la inclinación de estriaciones con un pitch de 24-30°E y NE, los ore shoot relacionados al σ_2 son de 59° al Oeste. Este episodio deformacional afectó significativamente las unidades del Grupo Excelsior, constituido por metasedimentos paleozoicos con un comportamiento mecánico predominantemente frágil-dúctil, y el Grupo Mitú, conformado por depósitos volcanosedimentarios del pérmico-triásico, cuya

deformación se manifestó a través de estructuras frágiles asociadas a zonas de cizalla de alto ángulo.

El análisis estructural de campo revela que estas fallas han sido reactivadas en múltiples eventos, lo que ha generado la formación de zonas de cizalla transcurrentes con evidencias de estriaciones, desplazamientos escalonados y estructuras Riedel. Estos rasgos cinemáticos han condicionado la evolución estructural de la región, facilitando la apertura de espacios de baja presión en los que se alojaron fluidos hidrotermales mineralizantes. La mineralización vinculada a este evento se observa en vetas 722 y San Cristóbal, donde los controles estructurales ejercidos por las fallas sinestrales han influido en la formación y disposición de vetas con alto contenido metálico (Figura 39).

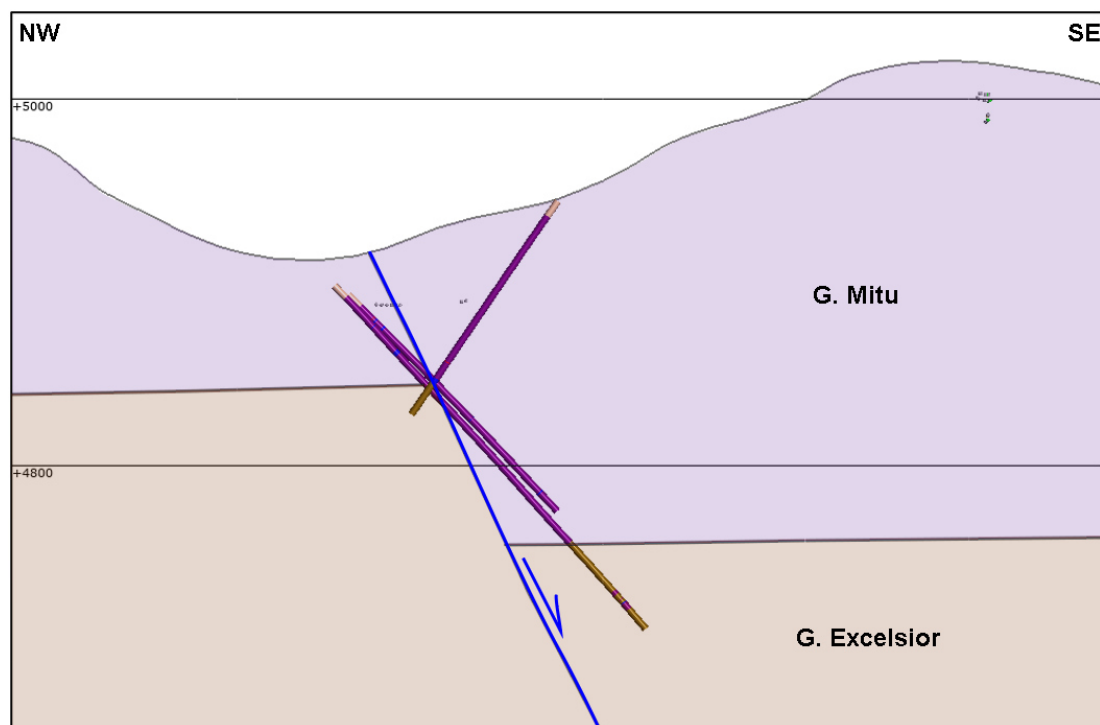


Figura 37. Salto de falla San Cristobalito en Tajo Oyama.

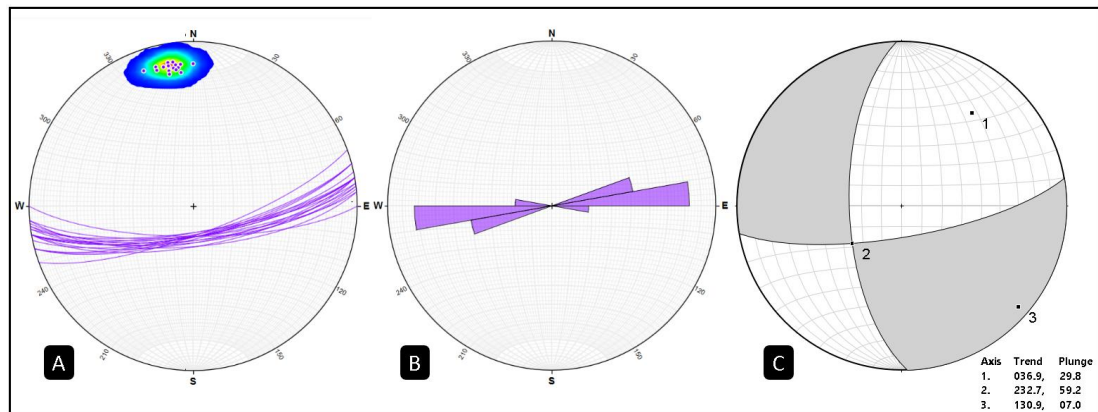


Figura 38. Cuarto Evento Estructural. A.- Diagrama de polos y contornos, B.- Diagrama de rosetas con orientación promedio NE-SW, C.- Diagrama de diedro rectos.

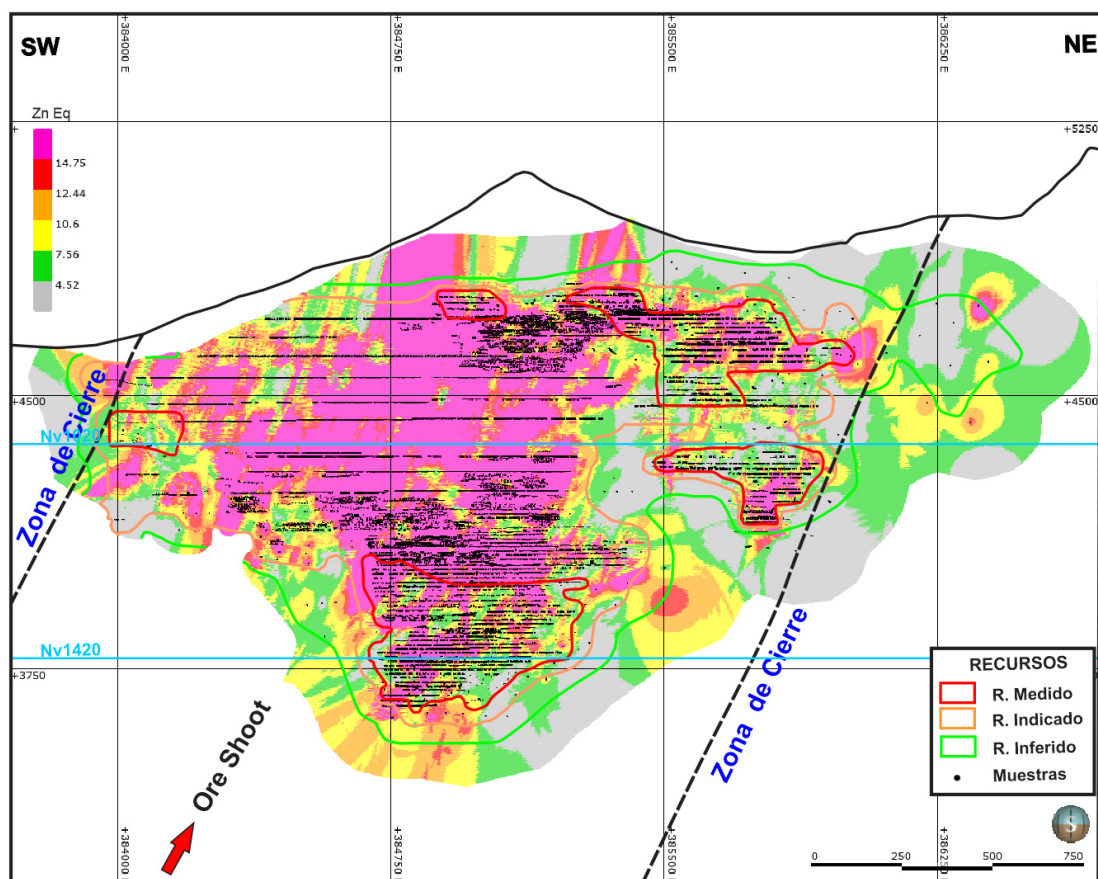


Figura 39. Veta 722, modelo de bloques mostrando zinc equivalente con la posición del ore shoot correspondiente al cuarto evento estructural.

La cartografía estructural y la distribución de los sistemas de fracturamiento en estas vetas indican que la deformación asociada a este evento ha jugado un papel fundamental en la segmentación y redistribución del control estructural de la mineralización. La interacción entre este cuarto evento y las estructuras heredadas de deformaciones previas ha resultado en la formación de zonas de debilidad preferenciales que han favorecido la migración y precipitación de minerales en niveles estructurales específicos dentro de la Cordillera Occidental.

También es importante resaltar que operativamente se viene extrayendo mineral de vetas que tienen distintos controles estructurales como es el caso de las vetas 658 y San Cristóbal donde tenemos el tercer y cuarto evento estructural. En el sector Oeste tienen una dirección E-W, mientras que al Este cambian a N45°E, este cambio da lugar a distintos ore shoots durante la exploración (Figura 40). Esta situación también nos trae oportunidades de exploración de nuevos recursos y reservas en sus continuidades laterales de cada uno de los sistemas.

Los resultados obtenidos permiten establecer un modelo evolutivo de la deformación en la zona de estudio, evidenciando la relación entre los eventos tectónicos y los procesos de mineralización asociados. La sucesión de eventos estructurales registrados ha condicionado la reactivación de sistemas de fallamiento preexistentes, generando zonas de cizalla y estructuras de deformación frágil a frágil-dúctil, que han servido como conductos preferenciales para la circulación de fluidos hidrotermales mineralizantes.

El análisis estructural revela que las condiciones geodinámicas de la región han estado influenciadas por regímenes compresivos y transtensionales, relacionados con la evolución tectónica de la Cordillera Occidental. Estas condiciones han controlado la distribución y concentración de metales base en los yacimientos estudiados, favoreciendo la deposición de mineralización en espacios abiertos generados por el fallamiento extensional y la dilatación en corredores estructurales activos.

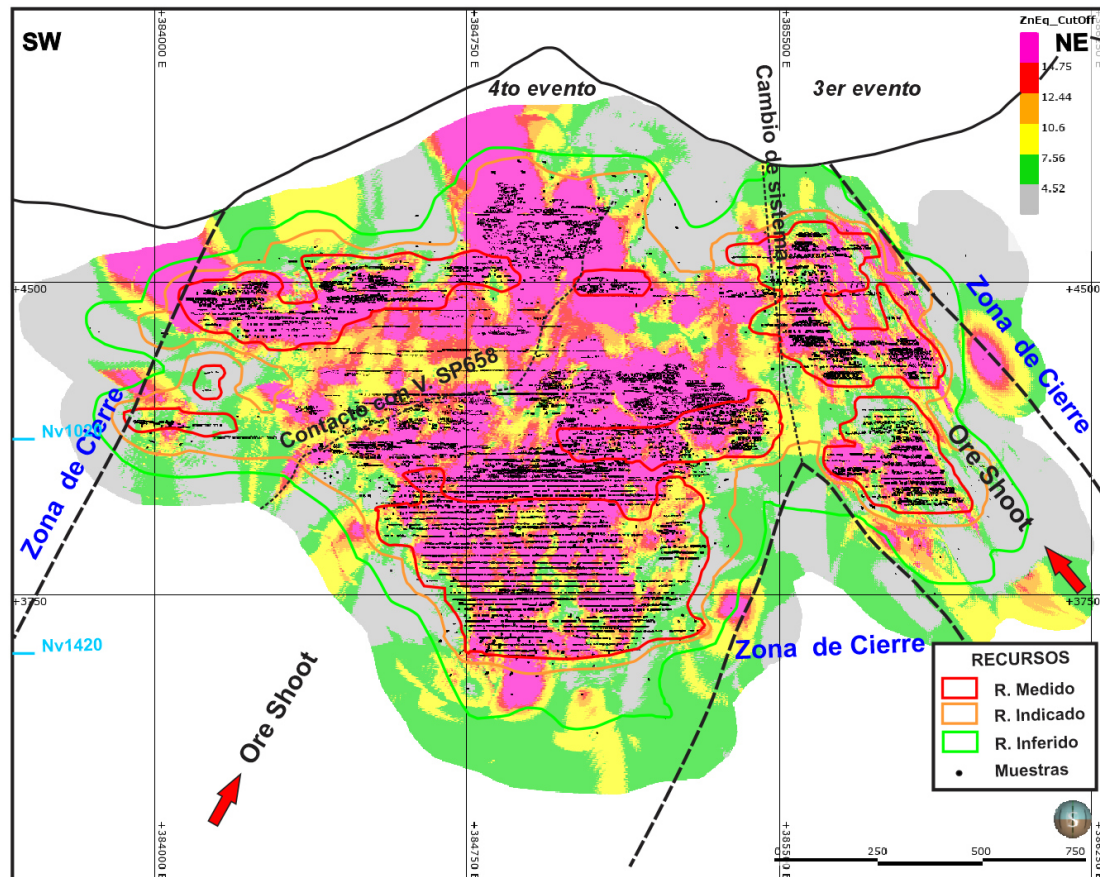


Figura 40. Veta 658, modelo de bloques mostrando la intersección de dos sistemas estructurales ambos mineralizados y con distintos ore shoots.

La correlación entre los eventos estructurales y la mineralización permite definir un marco interpretativo sólido para la exploración geológica, debido al entendimiento de los controles estructurales y su cronología es clave para predecir la continuidad y la geometría de los cuerpos mineralizados. Estos resultados proporcionan una base científica fundamental para optimizar futuras campañas exploratorias en la región, permitiendo focalizar esfuerzos en estructuras con mayor potencial de albergar mineralización económica.

5.3. Reología en las rocas portadoras de vetas polimetálicas

Los procesos hidrotermales han originado sistemas de vetas polimetálicas de tendencias subverticales, en las diferentes secuencias estratigráficas que definen la zona. En cada litología por donde se emplaza la

mineralización, se puede determinar características que se diferencian unas con respecto a las otras. Los principales componentes que desarrollan los sistemas de fracturamiento se deben a factores intrínsecos, estos estarán influenciados por la composición litológica, tamaño del grano, grosor de los estratos, porosidad, permeabilidad y diagénesis entre otros.

5.3.1. *Reología del Grupo Excelsior*

La secuencia estratigráfica está comprendida entre litologías que se comportan como sistemas frágiles y dúctiles, lo que le confiere competencias distintas e indican el carácter polifásico de los sistemas de fracturación que afectan de manera diversas a las secuencias litificadas. Según el diagrama de rosetas las tendencias al fenómeno de fracturamiento tendrán orientaciones diversas (Figura 41), los azimuts están restringidos al primer cuadrante noreste. Siendo las variaciones de las orientaciones supeditadas a las secuencias de filitas, metavolcánicos y volcaniclásticos, lo que origina que el vector lineal ascendente de los sistemas hidrotermales procedan a fracturarlo de diversas formas.

Siendo los sistemas de fracturas con tendencia a la subvertical cuando sean más frágil (metavolcánicos), alejándose de la subverticalidad a medida que la roca se comporte como un sistema frágil-dúctil (volcaniclástico y filitas). Los diversos factores que modifican el sistema de fracturamiento están dados por la textura foliada de la filita, una característica importante que acotar es que en las filitas el rumbo N66°/68SE no es continuo, presentando constantemente inflexiones, permitiendo a los fluidos ascender por su estructura laminar, planar y ondulada, teniendo esta roca una menor resistencia ante el ascenso de los fluidos mineralizantes,

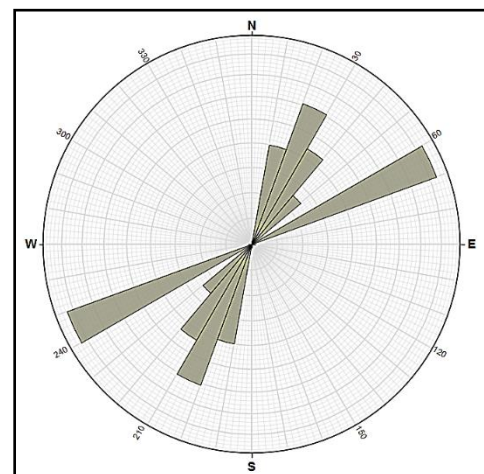


Figura 41. *Tendencia de los fracturamientos del Grupo Excelsior.*

alejándose de las orientaciones submediales. En cambio, en las litologías metavolcánicas y volcanoclásticos, al ser sistema más de tipo frágil el comportamiento mecánico será de mayor rigidez a un evento vectorial ascendente de los fluidos hidrotermales, sumado además al gran grosor de esta unidad litológica hace que el evento mineralizado tenga a fracturar de manera subvertical.

5.3.2. Reología del Grupo Mitu

Se encuentran formadas por secuencias lávicas, tobas de cristales, volcansedimentarios y tobas líticas del Grupo Mitu. Pueden originar sistemas de fracturamiento subverticales debido a una variedad de factores geológicos y procesos físicos. Cuando los fluidos ascienden, ejercen una presión sobre las rocas que encuentran a su paso. Las rocas volcánicas, debido a su composición y a los procesos a los que están sometidas durante su formación, pueden ser relativamente frágiles y susceptibles a fracturarse bajo esta presión. Los diversos datos tomados en campo en los sistemas de fracturamiento en las rocas cajas (Figura 42) nos dan una tendencia promedio de N40°E y un buzamiento de 60°SE.

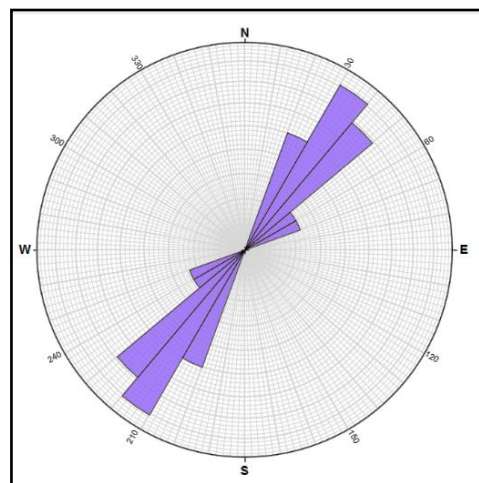


Figura 42. Tendencia de los fracturamientos del Grupo Mitu.

Las variaciones en cuanto a sus tendencias, se debe a la capacidad portante de la roca, habiendo variaciones cuando la litología es más competente como las secuencias volcanoclásticas estarán más orientados a la subverticalidad mientras que las litologías volcansedimentarias estarán en un rango del tipo submedial.

5.3.3. Reología del Grupo Pucará

Están conformadas por secuencias carbonatadas asignadas al Grupo Pucará, compuesto por estratos de dolomías y calizas en mayor proporción. La formación de fracturas de tendencia submedial, puede originarse por la presión de los fluidos hidrotermales durante el ascenso interactuando con el espesor de los estratos, la presión de poros, tensión diferencial, reactivación de fracturas preexistentes, disolución, rellenado de

fracturas, y esfuerzos tectónicos. Estos procesos pueden interactuar de manera compleja para generar un sistema de fracturamiento de tendencia mayor a los 45° de la vertical. La medición de datos estructurales se realizó en las rocas cajas del sistema vetiforme principal. Según los datos cuantitativos, se ha determinado que los fracturamientos tienen un promedio general de N47°E y un buzamiento de 74°SE (Figura 43). La roca de tendencia dúctil ante un fracturamiento del tipo ascendente y adicionando parámetros de espesor más la disposición de los estratos de la secuencia estratigráfica va a desarrollar sistemas de fracturamientos submedial.

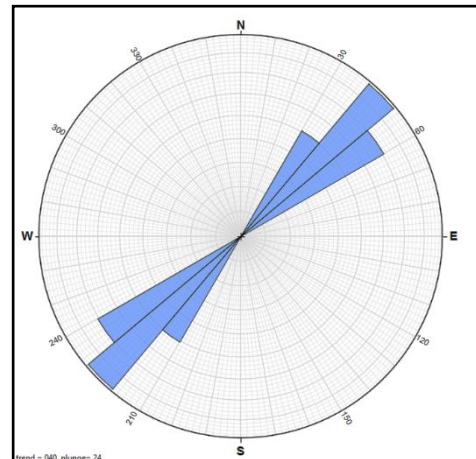


Figura 43. Tendencia de los fracturamientos del Grupo Pucará.

Con los datos obtenidos en los sistemas de fracturamiento en las diversas litologías de las rocas cajas, donde las vetas, fracturan la roca para su emplazamiento por metales base. Se puede mencionar que en el Grupo Excelsior se comporta con un sistema de fracturamiento del tipo medial originada por la foliación de las filitas, comportándose como un sistema dúctil - frágil. El Grupo Mitu, se comporta con un sistema del tipo frágil-dúctil, donde el desarrollo del fracturamiento es subvertical por la competencia de las secuencias que lo conforman. Las secuencias calcáreas presentan sistemas mediales comportándose como un sistema dúctil- frágil por su granulometría fina.

5.4. Aplicación práctica de la Reología en los sistemas vetiformes

Para la caracterización del comportamiento reológico de rocas que ocurren en las minas San Cristóbal - Carahuacra se eligieron vetas que intercepten las tres unidades litológicas que albergan la mineralización. La unidad más antigua corresponde al Grupo Excelsior constituido por filitas y meta volcánicos, seguido del Grupo Mitu constituido por lavas andesíticas, tobas de cristales, volcano sedimentarios y tobas líticas, suprayaciendo tenemos a al Grupo Pucara constituido por secuencias calcáreas, cada uno de estos grupos mencionados presentan características diferentes ante la deformación, fallamiento y mineralización.

Las vetas ML y Mary ambas están ubicadas en la zona de Carahuacra tiene una dirección promedio N45°E con buzamientos de 70°SE, pitch promedio de 45°SW y plunge 45°NE. Cuando las soluciones hidrotermales atraviesan las distintas unidades litológicas, estas presentan características diferentes, en el Grupo Excelsior las vetas son más angostas y en ocasiones se ramalean cuando la calidad de la roca es regular, cuando cortan rocas del Grupo Mitu las vetas muestran un buen desarrollo en cuanto a sus potencias, en el Grupo Pucara el desarrollo de la mineralización es bueno tanto en vetas como mantos el inconveniente en esta unidad es que la calidad de la roca es muy mala para efectos de minado (Tabla 7). Para la caracterización de calidad de la roca se usó parámetros de Bieniawski, Z. T. (1989).

Las filitas del Grupo Excelsior ante una deformación frágil se pliegan, generando fallas que se encuentran mineralizadas, las secuencias de esta unidad presentan un fracturamiento moderado con una calidad de roca que va desde regular a mala, esto debido a la foliación que presentan las filitas, lo cual hace que se eleven los costos por sostenimiento, las vetas tienden a ramalearse en superficie, y no son muy continuas sus potencias por ser irregulares.

Los volcánicos del Grupo Mitu por su parte presenta rocas cajas competentes en la mayoría de las ocasiones, la calidad de roca es regular a

buena, presenta mejores condiciones para el minado. En cuanto a la mineralización hospedada en este Grupo hace que las vetas sean conspicuas bien conformadas continuas con algunas zonas de cierre de acuerdo con las inflexiones y cinemática, en campo se les puede cartografiar y encontrar su continuidad.

Tabla 7. Características de RQD, RMR y Calidad de Roca para las diferentes unidades.

Litología	RQD	RMR	Calidad de Roca
Grupo Excelsior			
Filitas	40-80	38-65	Regular a buena
Filitas bituminosas	25-60	28-45	Mala
Filitas grises	50-90	43-70	Regular a buena
Zonas de alto fracturamiento	15-28	23-38	Mala
Grupo Mitu			
Andesitas	30-75	41-50	Regular
Dacitas	45-80	41-65	Regular a buena
Tobas	57-60	41-55	Regular
Grupo Pucará			
Secuencias calcáreas	30-41	31-45	Mala a regular
Zonas de alto fracturamiento	20-25	31-40	Mala

Nota: Características de RQD, RMR y Calidad de Roca para las diferentes unidades.

El Grupo Pucara está constituido por secuencias calcáreas, presentan dos estilos de mineralización, tipo vetas y mantos, ante los eventos tectónicos ocurridos en esta zona las calizas presentan un fracturamiento intenso, la calidad de la roca es mala para el minado, lo cual incrementa los costos de minado por sostenimiento.

5.5. Análisis de paleoesfuerzos.

Con el apoyo del software Win Tensor se realizó un análisis de paleoesfuerzos para el segundo, tercer y cuarto evento estructural, donde se desprenden las siguientes conclusiones, tenemos como resultados σ_1 08°/076° y σ_3 05°/167° ambos subhorizontales lo cual evidencia las fallas de rumbo, el σ_2 80°/289° por su parte se es subvertical el mismo que está relacionado a los diferentes oroshoots (Figura 44). La recomendación en este punto es que para el tratamiento de datos debe hacerse por evento estructural, si mezclamos los datos podríamos llegar a conclusiones erróneas, cada evento estructural debe ser trabajado de forma independiente, ya que corresponden a tiempos diferentes.

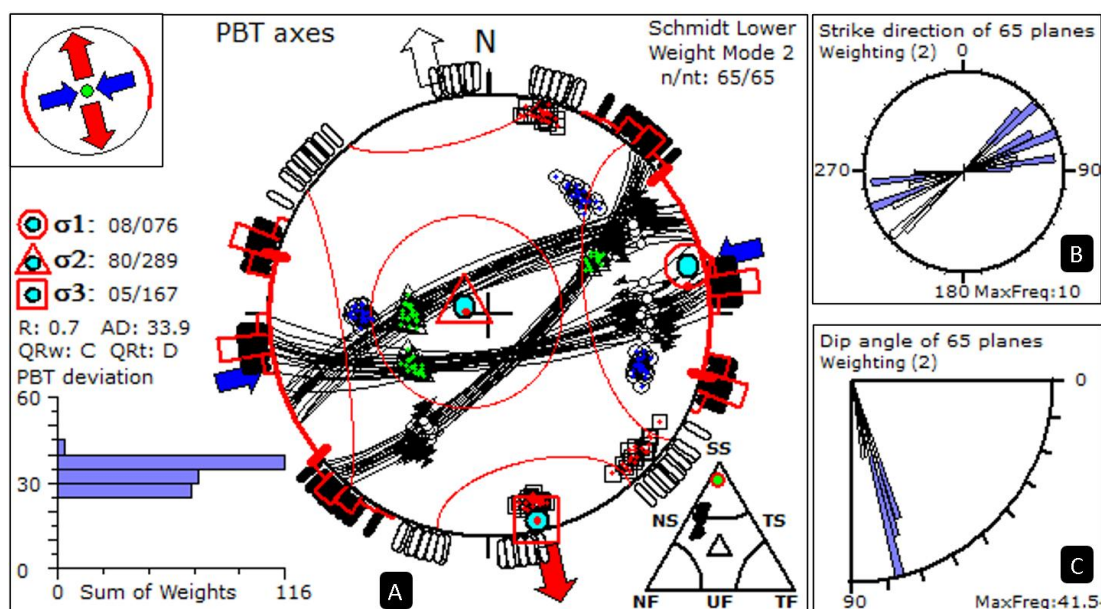


Figura 44. Análisis de paleo esfuerzos en el software Win Tensor, con todos datos estructurales del segundo, tercer y cuarto Evento A) Análisis PBT, B) Diagrama de Rosetas y C) Ángulos de buzamiento de toda la población de datos.

5.6. Oportunidades de nuevos targets de exploración.

Siguiendo la lógica de que el tercer evento estructural habría dado lugar a la formación de mantos, existen tajos ya explotados, de los cuales no se tiene sus feeders, bajo este escenario es una oportunidad por perforar y encontrarlos, desde la ubicación 383317.28, 8703871.69, 4080.61 con un

azimut 108.87, una inclinación 3° y una longitud de 640 metros, podríamos interceptar 04 estructuras totalmente nuevas que dieron origen a los mantos Santa Agueda, Galáctico y 423, los cuales se sitúan entre las zonas operativas de San Cristóbal - Carahuacra, específicamente entre el sistema de fallas conocido como Angelas y veta Lourdes, (Figuras 45 y 46).

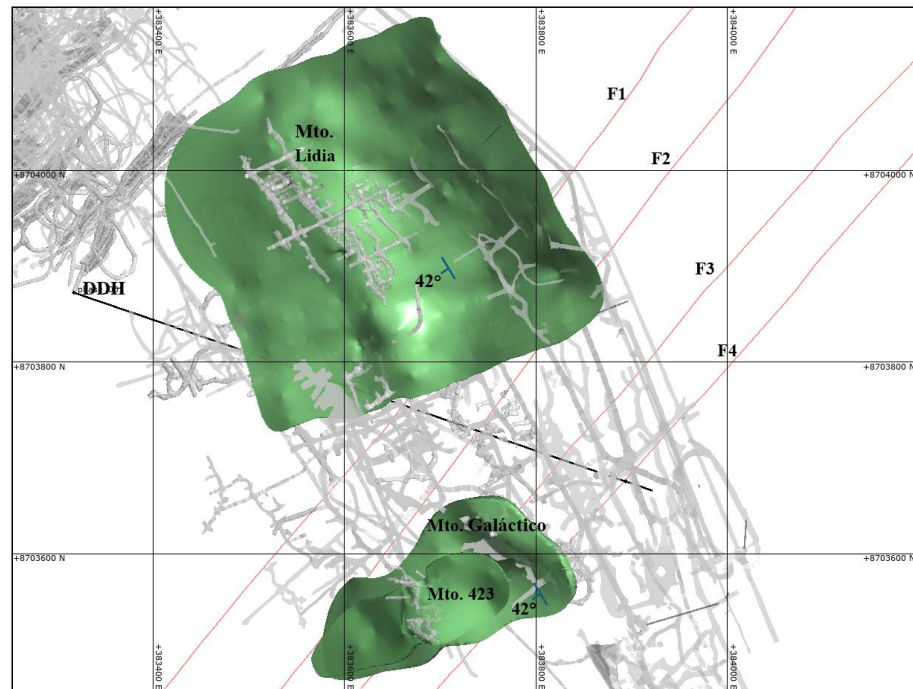


Figura 45. Planta cota 4100, oportunidad de encontrar feeders alimentadores de los mantos Lidia, galáctico y 423.

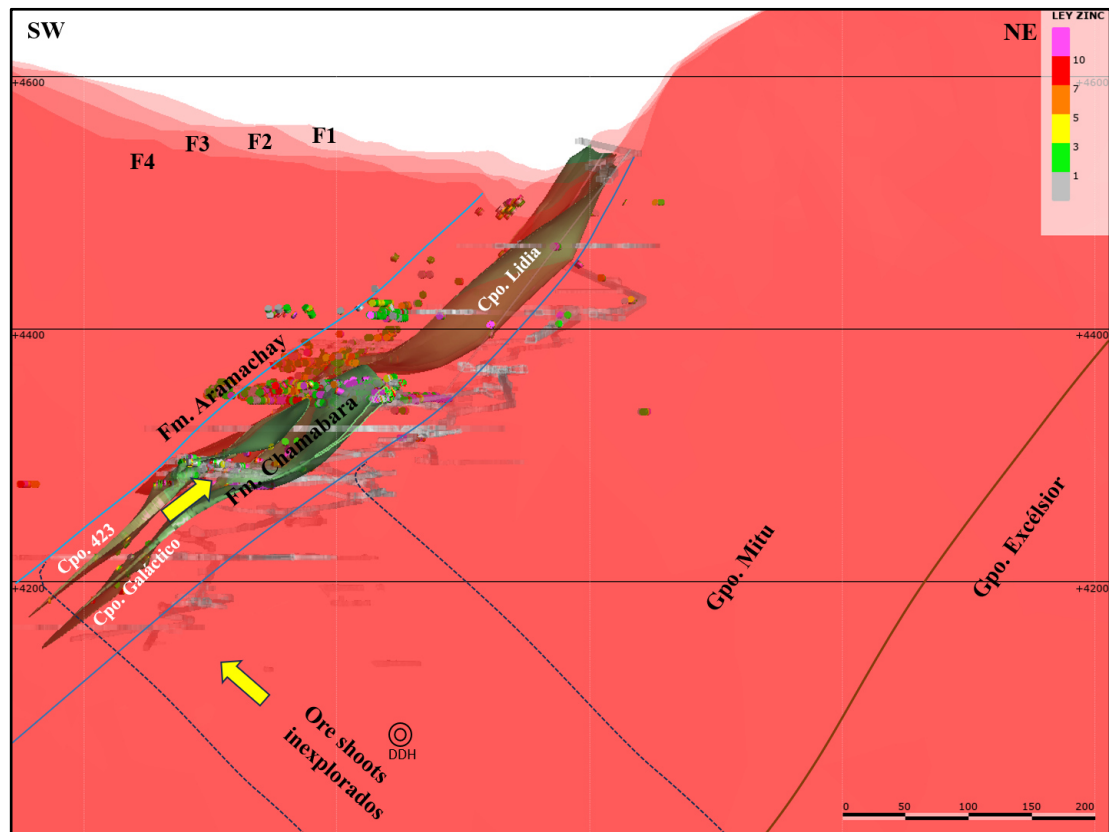


Figura 46. Sección longitudinal mostrando la ubicación de ore shoot inexplorados.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. DISCUSIÓN

La integración de la geología estructural en la caracterización y modelamiento de sistemas vetiformes representa un avance significativo en la comprensión de los procesos de mineralización. El levantamiento de datos estructurales cuantitativos en campo, complementado con estudios de petrología, geoquímica y geofísica, permite una interpretación más precisa de la geometría de las vetas, su cinemática y los controles estructurales que influyen en la distribución de los recursos minerales. Esta sinergia facilita la optimización del diseño de sondajes diamantinos durante la etapa de exploración, maximizando la eficiencia en la intersección de zonas de alta prospectividad, este enfoque se ha aplicado desde el año 2022.

El análisis de los **pitches** en cada sistema estructural permite determinar los plunjes de mineralización, los cuales pueden ser modelados mediante elipsoides de búsqueda para la estimación de recursos. La correcta integración de estos parámetros en un modelo de bloques permite mejorar la precisión en la planificación minera, optimizando la estimación de tonelajes y leyes, y asegurando una adecuada gestión de los stocks de minado tanto a corto como a largo plazo.

Desde un punto de vista geomecánico, las propiedades reológicas de la roca encajonante desempeñan un papel crucial en la estabilidad de las estructuras mineralizadas. En términos de índice de calidad de la roca (**RQD, Rock Quality Designation**) y clasificación geomecánica (**RMR, Rock Mass Rating**), las rocas volcánicas exhiben el mejor comportamiento estructural, seguidas de las rocas metamórficas, mientras que las rocas calcáreas presentan la menor competencia mecánica debido a su susceptibilidad a procesos de disolución y alteración hidrotermal. Estas características deben considerarse en el diseño de labores mineras y en la selección de métodos

de explotación adecuados para minimizar riesgos geotécnicos y garantizar la sostenibilidad operativa.

6.2. CONCLUSIONES.

- Los sistemas de vetas San Cristóbal - Carahuacra conforman el principal sistema mineralizado del distrito minero de Yauli. Estos sistemas han sido clasificados como depósitos del tipo cordillerano con pulsos polifásicos de los estadios A, B y C, controlados por distintos sistemas estructurales. El análisis de los afloramientos lineales de estos sistemas de vetas permite una comprensión cualitativa de su rumbo, buzamiento y pitch, así como de las relaciones entre los diferentes sistemas de vetas. Además, proporciona información clave sobre el mecanismo de emplazamiento, las propiedades reológicas de la roca encajonante y su influencia en las variaciones estructurales locales dentro del campo de esfuerzos.

- El estudio identificó la presencia de cuatro sistemas de vetas y mantos polimetálicos con direcciones andinas y antiandinas con buzamientos subverticales, los cuales atraviesan el Anticlinal de Chumpe, el primer evento estructural tiene una dirección NW-SE donde se hospedan los principales mantos. El segundo corresponde a fallas dextrales con orientación $N60^{\circ}-70^{\circ}E$ y buzamiento de $70^{\circ}NW$, con un pitch promedio de $26^{\circ}NE$, la posición de los ore shoots asociados al σ_2 es de 60° al Oeste, tercer evento estructural también pertenece a fallas normales dextrales de orientación $N45^{\circ}E$, con buzamientos de $70^{\circ}SE$ y un pitch promedio de $42^{\circ}SW$, los ore shoots asociados al σ_2 tienen una inclinación de 45° al Noreste, mientras que el cuarto evento estructural presenta un componente predominante de falla sinistral normal, evidenciado por la inclinación de estriaciones con un pitch de $24^{\circ}-30^{\circ}E$ y NE , los ore shoot relacionados al σ_2 son de 59° al Oeste. Los tres últimos eventos estructurales facilitaron la migración de los fluidos mineralizantes en la zona. Al analizar la cinemática de fallas y la secuencia de eventos estructurales nos permite comprender cómo se han desarrollado estos procesos a lo largo del tiempo. Asimismo,

ayuda a identificar la posición de las zonas de apertura por donde han circulado las soluciones mineralizantes. El análisis estructural ayuda a determinar la ubicación de zonas mineralizadas, lo que incrementa la tasa de éxito y la conversión de recursos en campañas de perforación, logrando resultados positivos en la generación de nuevos recursos y reservas.

6.3. RECOMENDACIONES

- Se recomienda integrar los plunges de mineralización con los elipsoides de búsqueda en los modelos de bloques. En la presente investigación se cambiaron los plunges de mineralización para algunas estructuras principales como la veta 658, veta 722, veta K entre otras, al integrar los plunges de mineralización con los elipsoides de búsqueda, de alguna manera se induce a la exploración en el lugar correcto dentro del equipo de trabajo, asimismo se van a planificar los stocks de minado de los futuros años en zonas de interés económico.

- Evaluar la Formación Chambará o unidades geológicas equivalentes, conociendo su potencial para albergar mineralización polimetálica, ésta formación debería ser un objetivo prioritario en la búsqueda de nuevos depósitos. Al explorar unidades geológicas potencialmente mineralizadas, se debe prestar especial atención a la presencia de rocas con características propicias para la mineralización

- Se recomienda investigar unidades equivalentes a la Formación Aramachay, debido a su baja reactividad y permeabilidad, producto de sus abundantes nódulos silíceos, actúa como sellos efectivos frente a las soluciones hidrotermales dando lugar a la formación de mantos. Otra roca sello lo representa el basalto montero el cual se sitúa entre las Formaciones Aramachay y Condorsinga, es otra zona prospectiva que actúa como trampa estratigráfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D., y Chomiak, B. (2001). Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. En T. Albinson y C. E. Nelson (Eds.), *New mines and discoveries in Mexico and Central America* (SEG Special Publication 8, pp. 1-32). Society of Economic Geologists.
- Bartlett, M. W. (1984). *Petrology and genesis of carbonate-hosted Pb-Zn-Ag ores, San Cristobal district, Department of Junin, Peru* [Doctoral dissertation, Oregon State University].
- Bendezu, R., Fontboté, L., y Cosca, M. (2003). Relative age of Cordilleran base metal lode and replacement deposits, and high sulfidation Au-(Ag) epithermal mineralization in the Colquijirca mining district, central Peru. *Mineralium Deposita*, 38, 683-694.
- Bott, M. H. P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96, 109-117.
- Campbell, A. R., Rye, D., y Petersen, U. (1984). A hydrogen and oxygen isotope study of the San Cristobal Mine, Peru: Implications of the role of water to rock ratio for the genesis of wolframite deposits. *Economic Geology*, 79(8), 1818-1832.
- Casas Sainz, A. M., Gil Peña, I., y Simón Gómez, J. L. (1990). Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: Sistemática y técnicas de aplicación. *Estudios Geológicos*, 46, 385-398.
- Cox, S. F. (2020). The dynamics of permeability enhancement and fluid flow in overpressured, fracture-controlled hydrothermal systems. En J. V. Rowland y D. A. Rhys (Eds.), *Applied structural geology of ore-forming hydrothermal systems* (Reviews in Economic Geology 21, pp. 25-82). Society of Economic Geologists.
- Cox, S. F., Knackstedt, M. A., y Braun, J. (2001). Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. En J. P. Richards

- y R. M. Tosdal (Eds.), *Structural controls on ore genesis* (Reviews in Economic Geology 14, pp. 1-24). Society of Economic Geologists.
- Dalmayrac, B., Laubacher, G., y Marocco, R. (1988). *Caracteres generales de la evolución geológica de los Andes Peruanos* (Boletín D 12). INGEMMET.
- Einaudi, M. T. (1977). Environment of ore deposition at Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology*, 72(6), 893-924.
- Einaudi, M. T. (1982). Description of skarns associated with porphyry copper plutons. En S. R. Titley (Ed.), *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America* (pp. 139-183). University of Arizona Press.
- Einaudi, M. T. (1994). *High sulfidation and low sulfidation porphyry copper/skarn systems: Characteristics, continua, and causes* [Notas de conferencia no publicadas EN INGLÉS]. Society of Economic Geologists, International Exchange Lecture.
- Fontboté, L. (2006, 6-16 de junio). *Cordilleran (= well zoned) base metal veins and replacement bodies as "normal" constituents of porphyry systems* [Ponencia]. Curso Latinoamericano de Metalogenia UNESCO-SEG-SGA, Antofagasta, Chile.
<https://es.scribd.com/presentation/340521942/Cordilleran-LF>
- Groshong, R. H. (2006). *3-D structural geology* (2.^a ed., pp. 305-371). Springer-Verlag.
- Hill, D. P. (1977). A model for earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research*, 82(8), 1347-1352.
- Kobe, H. W. (1990). Stratabound sulfide occurrences in the Paleozoic of the Yauli Dome, central Peru. En L. Fontboté, G. C. Amstutz, M. Cardozo, E. Cedillo y J. Frutos (Eds.), *Stratabound ore deposits in the Andes* (pp. 113-122). Springer Berlin Heidelberg.
- Laurent, G., Jolivet, M., Dall'Asta, L., Jourdon, A., y Lahfid, A. (2016). 3D geological modelling and structural evolution of the Pyrenean-Cantabrian belt. *Tectonophysics*, 687, 74-94.

- Lepry, L. A., Jr. (1981). *The structural geology of the Yauli Dome Region, Cordillera Occidental, Peru* [Tesis de maestría EN INGLÉS, Colorado School of Mines].
- Lillo, J., y Oyarzun, R. (2013). *Geología estructural aplicada a la minería y exploración minera: Principios básicos*. Ediciones GEMM-Aula2pontonet.
- Lisboa, H. (2002). *Etude de la veine 722 à Zn-Pb-Ag de la mine San Cristobal-Huaripampa (District minier de Domo de Yauli, Pérou central)* [Travail de diplôme, Université de Genève].
- Lyons, W. A. (1968). The geology of the Carahuacra mine, Peru. *Economic Geology*, 63(3), 247-256.
- McLaughlin, D. H. (1925). Notas sobre la geología y fisiografía de los Andes Peruanos en los departamentos de Lima y Junín. *Informes y Memorias de la Sociedad de Ingenieros del Perú*, 27(2), 69-107.
- Mégard, F. (1968). *Geología del cuadrángulo de Huancayo, Hoja 25-m* (Boletín A 18). INGEMMET.
- Muntean, J. L., y Einaudi, M. T. (2001). Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 96(4), 743-772.
- Naylor, M. A., Mandl, G. T., y Supesteijn, C. H. K. (1986). Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology*, 8(7), 737-752.
- Nelson, E. P. (2006). Drill-hole design for dilational ore shoot targets in fault-fill veins. *Economic Geology*, 101(5), 1079-1085.
- Newell, N. D. (1945). Investigaciones geológicas en las zonas circunvecinas al lago Titicaca. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 18, 44-68.
- Noble, D. C., y McKee, E. H. (1999). The Miocene metallogenic belt of central and northern Perú. En B. J. Skinner (Ed.), *Geology and ore deposits of the Central Andes* (SEG Special Publication 7, pp. 155-193). Society of Economic Geologists.

- Panca, F., y Breitzkreuz, C. (2010, 27 de septiembre-1 de octubre). *El Grupo Mitu (Pérmico Superior–Jurásico Inferior?), Sección Pallpa–Oqoruro, lado sureste de Pisac, Cusco, Perú: Facies volcanosedimentarias y geoquímica* [Ponencia]. XV Congreso Peruano de Geología, Cusco, Perú. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-223.pdf>
- Pardo-Casas, F., y Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), 233-248.
- PARTE, A. D. G. E. P., y RUBILAR, H. N. (1999). Geología Estructural Hans Niemeyer.
- Pastor Figueroa, J. A. (1970). *The mineralization in San Cristobal mine* [Informe técnico interno EN INGLES]. Cerro de Pasco Corporation.
- Petit, J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 597-608.
- Ramsay, J. G., y Huber, M. I. (1987). *The techniques of modern structural geology: Vol. 2. Folds and fractures*. Academic Press.
- Rhys, D. A., Lewis, P. D., y Rowland, J. V. (2020). Structural controls on ore localization in epithermal gold-silver deposits: A mineral systems approach. En J. V. Rowland y D. A. Rhys (Eds.), *Applied structural geology of ore-forming hydrothermal systems* (Reviews in Economic Geology 21, pp. 83-145). Society of Economic Geologists.
- Riedel, W. (1929). Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie B*, 354-368.
- Rivera, N., y Kobe, H. W. (1983). Evolución geológica del Domo de Yauli. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 72, 159-175.
- Rosas, S., Ritterbush, K., Bottjer, D., Corsetti, F., West, J., Berelson, W., ... PORQUE PONES TANTOS PUNTOS y Schaltegger, U. (2016). Profundización sedimentaria solo en la parte de la cuenca Pucará (Perú Central) durante el Hetangiano-Sinemuriano. En *Resúmenes del XVIII Congreso Peruano de Geología* (pp. 1-4). Sociedad Geológica del Perú.

- Rosas, S., y Fontboté, L. (1994). Evolución sedimentológica y análisis secuencial del Grupo Pucará en un perfil SW-NE en el Perú Central. En *Actas del VIII Congreso de Geología* (pp. 198-201). Sociedad Geológica del Perú.
- Salazar Díaz, H. (1983). *Geología de los cuadrángulos de Matucana y Huarochirí, Hojas 24-k y 25-k* (Boletín A 36). INGEMMET.
- Sallier, B. (2001). *Minéralisations stratiformes à Zn, Pb, $\pm$ Ag dans les calcaires du Pucará (Domo de Yauli, Andes du Pérou Central): Etude pétrographique, structurale, isotopique ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et microthermométrie des inclusions fluides* [Diplôme d'Ingénieur Géologue, Université de Genève].
- Sawkins, F. J. (1972). Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *The Journal of Geology*, 80(4), 377-397.
- Shaw, H. R. (1980). The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. En R. B. Hargraves (Ed.), *Physics of magmatic processes* (pp. 201-264). Princeton University Press.
- Sibson, R. H. (1987). Earthquake rupturing as a hydrothermal mineralizing agent. *Geology*, 15(8), 701-704.
- Sibson, R. H. (1990). Conditions for fault-valve behaviour. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1), 15-28.
- Sibson, R. H. (1994). Crustal stress, faulting and fluid flow. *Geological Society, London, Special Publications*, 78(1), 69-84.
- Sibson, R. H. (1996). Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18(8), 1031-1042.
- Sibson, R. H. (2001). Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition. En J. P. Richards y R. M. Tosdal (Eds.), *Structural controls on ore genesis* (Reviews in Economic Geology 14, pp. 25-50). Society of Economic Geologists.
- Sibson, R. H., Robert, F., y Poulsen, K. H. (1988). High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16(6), 551-555.

- Snively, N. (1946). *Geology of the Carahuacra Valley* [Informe técnico interno]. Cerro de Pasco Corporation.
- Snively, N., y Kruger, F. C. (1944). *Geology of San Cristobal Mine Area* [Informe técnico interno]. Cerro de Pasco Corporation.
- Somoza, R., y Ghidella, M. E. (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: Subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4), 797-809.
- Tar buck, E. J., y Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8.^a ed.). Pearson Educación.
- Villegas, J., Tavera, H., Nocquet, J. M., y Chlieh, M. (2010). Cinemática de las placas Nazca y Sudamericana y zonas de acoplamiento en la interfaz de subducción del Perú a partir de datos GPS (Red LISN). En *Actas del XV Congreso Peruano de Geología* (Vol. 9, No. 5). Sociedad Geológica del Perú.

GLOSARIO

7.1. Plunge

El término Plunge se refiere a la inclinación de una línea en un plano tridimensional, medida desde la horizontal hacia abajo. Es una medida angular que describe cuánto se inclina una línea con respecto a un plano horizontal (Figura 47).

7.2. Pitch

El término Pitch (también conocido como Rake) se refiere al ángulo de inclinación de una línea dentro de un plano de falla. Es una medida fundamental para describir el movimiento relativo entre los bloques de una falla. El Pitch es crucial para determinar el tipo de movimiento en una falla, se puede identificar el sentido de movimiento de la falla si tiene un desplazamiento, caso contrario se puede apoyar con otros criterios cinemáticos para determinar el movimiento (Figura 47).

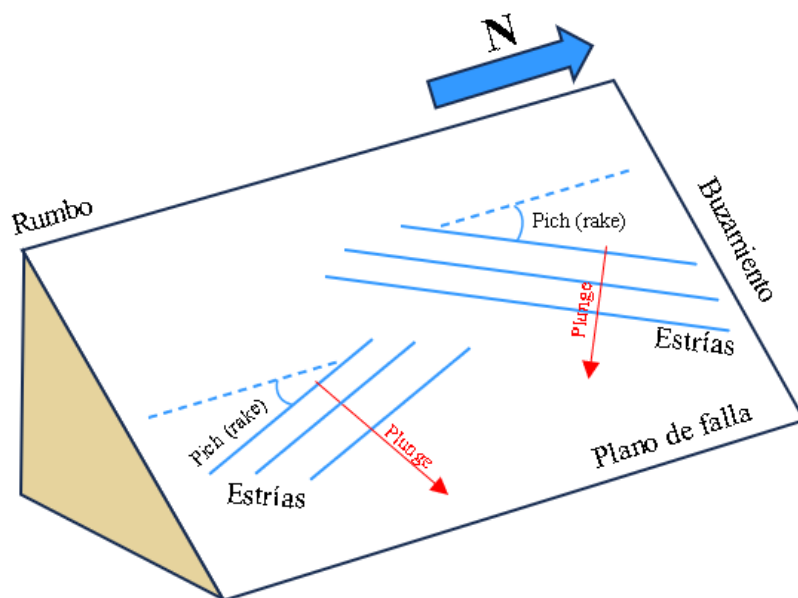


Figura 47. Rumbo, buzamiento, pich y plunge de una falla.

7.3. Cinemáticas de fallas

La cinemática de fallas es el estudio de los movimientos relativos entre los bloques que se separan por una falla, enfocándose en la dirección, el sentido y la magnitud del desplazamiento. Analiza cómo se han movido los bloques a lo largo del plano de falla, lo cual es importante para comprender la historia tectónica de una región.

7.4. Ore shoot

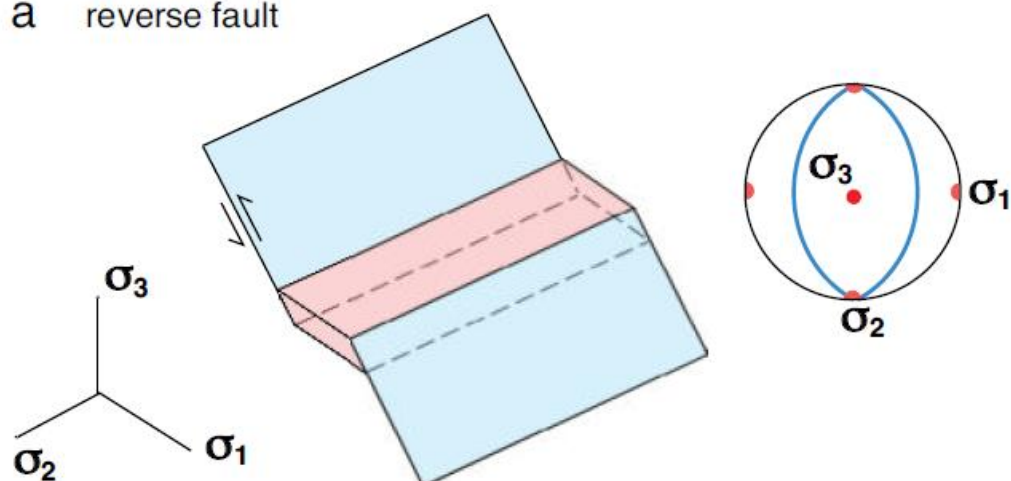
Un ore shoot es una zona concentrada y enriquecida de minerales dentro de una veta, filón o un cuerpo mineralizado. Estas concentraciones de mineral se forman donde las condiciones estructurales y geológicas favorecen la precipitación de minerales desde fluidos hidrotermales.

En su forma suelen ser alargados y seguir la orientación de zonas de apertura o debilidad estructural (fallas, fracturas). Con dimensiones que van desde unos pocos metros hasta varios kilómetros de longitud y profundidad. Están estrechamente relacionadas a la cinemática de las fallas, dando como resultado distintas posiciones para el ore shoot (Figura 48).

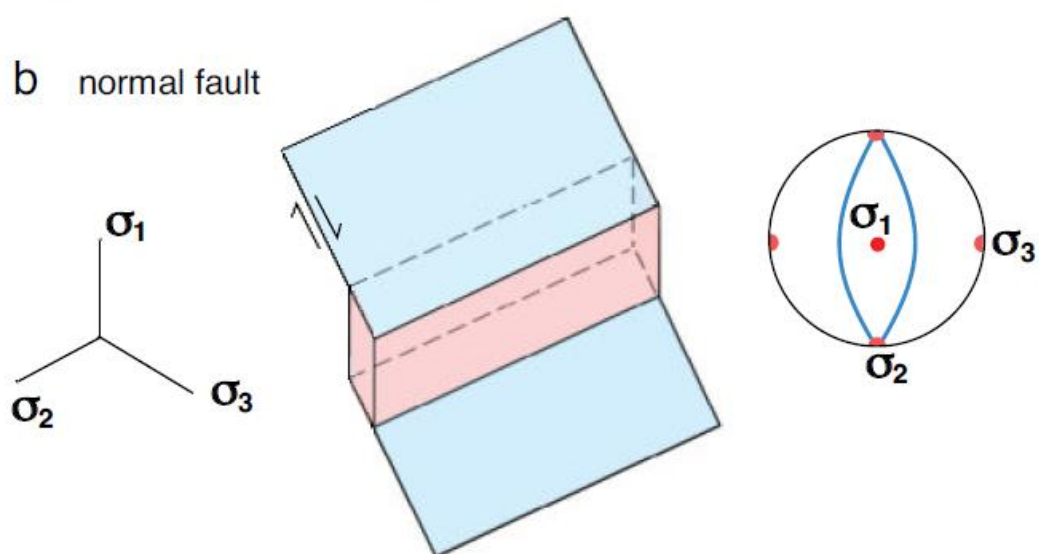
7.5. Diagrama de diedros

El gráfico de diedros rectos es una representación estereográfica utilizada en geología estructural para interpretar los estados de esfuerzo a partir de datos de mecanismos focales (sismos) o deslizamientos en fallas. El método de los diedros rectos es una herramienta gráfica para determinar las orientaciones de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , σ_3) y las zonas de compresión y extensión asociadas a un evento tectónico.

a reverse fault



b normal fault



c strike-slip fault

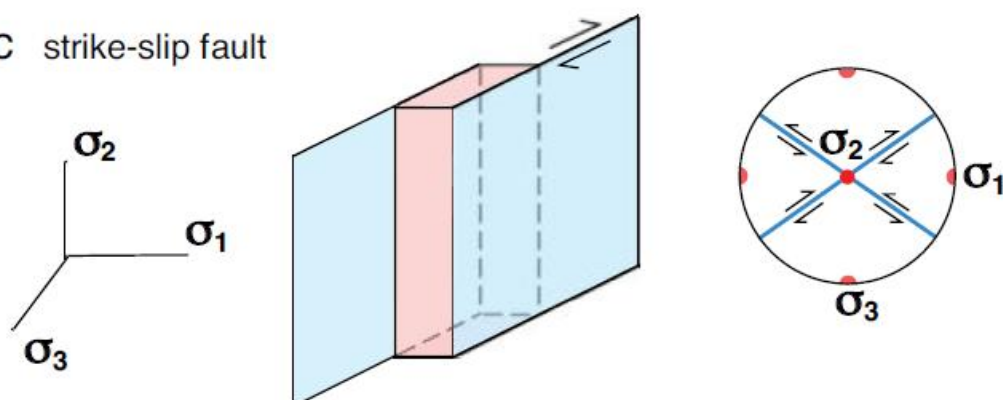


Figura 48. Posición de LOS DIFERENTES ORE shoots de acuerdo con el tipo de falla, modificado de (Cox, 2020).

Nota: (a) Fallas inversas, (b) fallas normales, y (c) fallas de rumbo. Los estereogramas indican la orientación del esfuerzo principal y sus orientaciones de falla conjugada (círculos máximos). Los jogs se alargan paralelamente al σ_2 .

7.6. Fallas de rumbo

Una falla de rumbo es un tipo de falla en la que el movimiento relativo entre los bloques es predominantemente horizontal, paralelo al rumbo de la falla. También conocidas como fallas de deslizamiento lateral, estas fallas son comunes en regiones tectónicas donde predominan los esfuerzos de cizalla. Se forman en un régimen tectónico transcurrente, dominado por un esfuerzo de cizalla (τ). El σ_1 y σ_3 son horizontales, mientras que σ_2 es vertical.

Hemos mantenido los términos en inglés y traducido al español o indicado otro término en inglés sinónimo, en el caso de las estructuras tipo cola de caballo, en español se puede usar el término abanico imbricado, que podrá ser extensional o compresional dependiendo de su posición y carácter dextral o sinistral de la zona de falla (Figura 49).

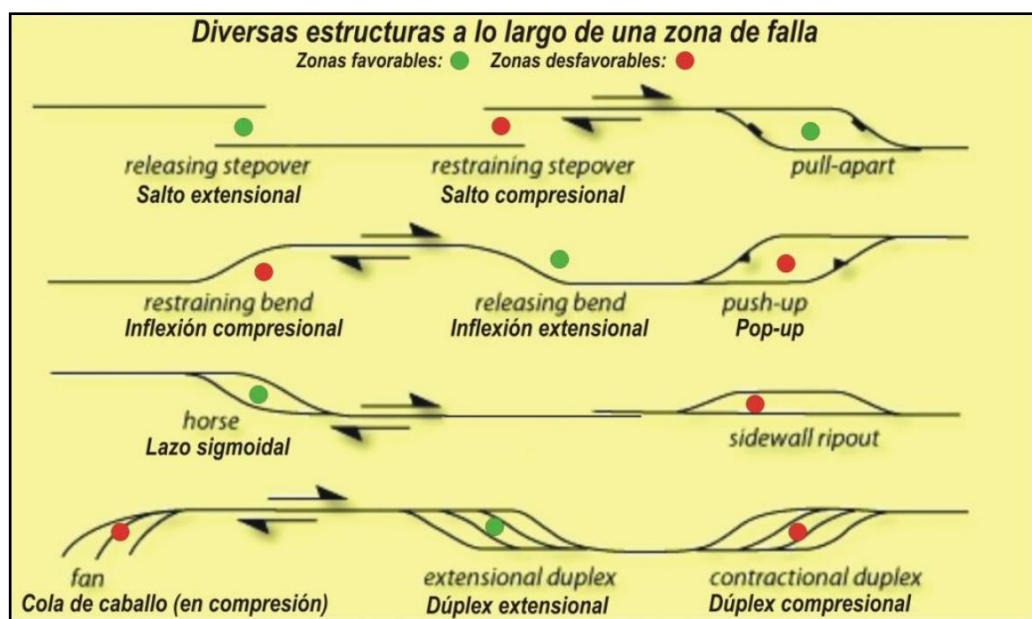


Figura 49. Principales estructuras asociadas a una zona de falla de rumbo (en este caso dextral), indicando los sectores favorables y desfavorables para albergar cuerpos minerales, modificado de (Lillo y Oyarzun, 2013).

7.7. Cuerpos de reemplazamiento.

Un cuerpo de reemplazamiento es un tipo de depósito mineral hidrotermal de baja sulfuración (Estadio A) que se forma cuando los fluidos mineralizantes reaccionan químicamente con calizas (San Cristobal - Carahuacra), volcanosedimentarios con matriz calcárea (Andaychagua), disolviendo parte de la roca original y reemplazándola por minerales nuevos. El tipo de fluido mineralizante, el control estratigráfico y estructural son importantes para la formación de estos depósitos.

7.8. Rocas subvolcánicas.

Una roca subvolcánica es un tipo de roca ígnea intrusiva que se forma a partir de magma que solidifica a poca profundidad bajo la superficie terrestre, tienen texturas intermedias entre las rocas volcánicas y plutónicas, generalmente son porfiríticas con matriz microcristalina. Estas rocas se emplazan en cuerpos intrusivos pequeños, como diques, sills, lacolitos o domos.

7.9. Boudinage.

Estructura de roca deformada por tensiones tectónicas donde ciertas partes son plegadas y elongadas en forma elíptica.

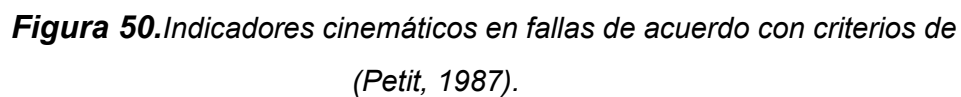
7.10. Reología.

Es la ciencia que analiza el comportamiento de las rocas ante determinado tipo de presiones y su respuesta a la elasticidad, rigidez y plasticidad. Los resultados sirven para resolver problemas tectónicos.

7.11. Dirección de movimiento de una falla.

Para establecer el vector de movimiento de una superficie de falla, es fundamental identificar los desplazamientos relativos que marcan los indicadores tabulares, usualmente estratos o vetas, que interceptan el plano de falla. No obstante, en numerosas ocasiones estos marcadores no están disponibles y se deben emplear otros métodos para determinar la dirección del movimiento de la falla. Las superficies de falla raramente son planas de manera absoluta y el desplazamiento de los bloques sobre estas superficies frecuentemente da lugar a la creación de surcos y estrías en el sentido del avance. La superficie alisada y pulida donde se halla las estrías es conocida como superficie "slickenside". Tras identificar la superficie de la falla y las estrías, los movimientos relativos entre un bloque y otro pueden determinarse a partir de diversas estructuras y microestructuras presentes en la superficie de la falla, (Petit, 1987).

Las estructuras secundarias generadas por el movimiento relativo de las paredes comprenden fracturas de extensión, vetas escalonadas, cortes de Riedel, escalones libres y escalones con minerales secundarios en la zona de sombra (Figura 50). Estos son considerados "indicadores cinemáticos frágiles" y deben utilizarse con precaución, puesto que únicamente registran el evento más reciente de movimiento y no aportan información sobre su edad absoluta. Solo mediante relaciones de corte con otras estrías en los mismos planos de falla es factible establecer una cronología relativa de los eventos.



Nota: Se muestra las relaciones geométricas y cinemáticas de estructuras en un sistema de cizalla simple, según los modelos análogos de deformación natural, (Riedel, 1929) y (Naylor et al., 1986).

ANEXOS

Anexo 1: Datos de los distintos eventos estructurales (Datum PSAD56).

Este	Norte	Cota	Az	Bz	Pitch	Estructura	Evento	Movimiento
385362	8702587	4775	240	74	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385656	8702855	5019	240	78	28	VETA	Evento 2	Dextral normal
385718	8702897	5030	240	78	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385339	8702873	4932	245	75	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385803	8702938	4999	246	74	28	VETA	Evento 2	Dextral normal
385439	8702962	4989	245	78	28	VETA	Evento 2	Dextral normal
385205	8702765	4873	242	76	27	VETA	Evento 2	Dextral normal
385251	8702794	4874	245	78	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385481	8702635	4860	244	76	29	VETA	Evento 2	Dextral normal
384878	8703666	4955	246	78	26	VETA	Evento 2	Dextral normal
385580	8703258	5025	244	73	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385589	8703247	5025	245	76	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385041	8703364	5000	250	74	27	VETA	Evento 2	Dextral normal
385018	8703346	5000	250	74	27	VETA	Evento 2	Dextral normal
385030	8703325	4990	245	75	28	VETA	Evento 2	Dextral normal
385003	8703321	4985	240	74	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
384981	8703316	4075	245	73	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
384996	8703373	5000	247	78	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385009	8703367	5010	250	78	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
384921	8703318	4950	240	75	30	VETA	Evento 2	Dextral normal
384787	8703229	4850	248	73	27	VETA	Evento 2	Dextral normal
385004	8703399	5015	246	70	24	VETA	Evento 2	Dextral normal
384833	8703264	4890	246	74	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
385520	8703050	5050	246	75	25	VETA	Evento 2	Dextral normal
386353	8703460	4995	46	75	45	VETA	Evento 3	Dextral normal
384769	8703648	4910	44	71	45	VETA	Evento 3	Dextral normal
384777	8703898	4885	42	72	42	FALLA	Evento 3	Dextral normal
384840	8703817	4990	45	72	38	VETA	Evento 3	Dextral normal
384703	8703814	4935	43	70	45	FALLA	Evento 3	Dextral normal
384629	8704095	4960	45	70	42	VETA	Evento 3	Dextral normal
384285	8704041	4835	48	74	40	FALLA	Evento 3	Dextral normal
385522	8703298	5010	45	74	37	VETA	Evento 3	Dextral normal
385523	8703338	5006	45	73	44	VETA	Evento 3	Dextral normal
385367	8703094	4950	45	72	45	VETA	Evento 3	Dextral normal
385094	8703370	5010	43	70	42	VETA	Evento 3	Dextral normal
385723	8702815	5014	40	72	40	VETA	Evento 3	Dextral normal
385628	8702685	4939	43	75	40	VETA	Evento 3	Dextral normal
384368	8704018	4901	43	73	44	VETA	Evento 3	Dextral normal
384431	8704091	4889	44	72	42	VETA	Evento 3	Dextral normal
384454	8704119	4870	44	76	44	VETA	Evento 3	Dextral normal

385709	8702842	5030	45	74	44	VETA	Evento 3	Dextral normal
385555	8702600	4891	45	75	40	VETA	Evento 3	Dextral normal
386098	8703249	4981	45	72	44	VETA	Evento 3	Dextral normal
384263	8704020	4825	47	75	45	FALLA	Evento 3	Dextral normal
383461	8705205	4718	47	75	40	VETA	Evento 3	Dextral normal
384352	8704128	4829	83	75	28	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384422	8704131	4829	85	75	30	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384800	8704029	5031	84	73	25	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384329	8703931	4879	75	75	24	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384480	8704067	4901	80	75	27	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384425	8704058	4886	80	75	25	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384810	8703671	4925	87	75	28	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384827	8703847	4990	90	76	25	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384660	8703813	4915	80	77	26	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384439	8703751	4810	80	75	25	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384312	8704031	4860	70	76	25	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
384235	8703999	4810	82	73	30	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
385262	8703124	4875	78	75	28	VETA	Evento 4	Sinistral normal
385784	8703270	4950	82	77	28	VETA	Evento 4	Sinistral normal
385162	8703451	5025	70	76	25	VETA	Evento 4	Sinistral normal
385161	8703564	5090	75	74	28	VETA	Evento 4	Sinistral normal
385113	8703548	5110	80	76	27	VETA	Evento 4	Sinistral normal
385094	8703631	5100	80	72	28	FALLA	Evento 4	Sinistral normal
385020	8703513	5050	83	72	28	VETA	Evento 4	Sinistral normal
384981	8703370	4995	85	70	30	FALLA	Evento 4	Sinistral normal

Anexo 2: Principales características de las vetas, mantos y cuerpos de las minas San Cristóbal-Carahuacra.

Evento estructural	Nombre de estructura	Long.	Prof.	Potencia Min.	Potencia Max.
Evento 1 Carahuacra	Manto Viejecita	700	280	0.50	4.00
	Cuerpo Huaripampa	170	500	2.00	72.00
	Cuerpo Huaripampa	215	532	2.00	38.00
	Manto Principal	45	390	0.23	3.70
	Manto Principal 1	63	380	0.70	5.15
	Manto Principal 2	56	413	1.00	6.50
	Manto Principal 3	42	420	0.36	6.70
	Cuerpo Lidia	495	370	1.00	90.00
	Cuerpo 423	150	335	0.60	18.00
	Cuerpo Galáctico	80	278	0.40	20.00
Evento 2 San Cristóbal	Veta H	300	650	0.30	0.40
	Veta I	300	740	0.30	1.20
	Veta J	220	640	0.30	0.80
	Veta K	920	700	0.30	1.50
	Veta Sara	1050	300	0.30	0.70
	Veta Araceli	200	325	0.40	1.80
	Veta Marita	480	360	0.60	1.80
Evento 2 Carahuacra	Veta Jazmín	814	245	0.35	3.65
	Veta Sandra	560	240	0.40	2.70
	Veta Diana	770	340	0.30	3.60
	Veta 1640	230	190	0.50	1.40
	Veta 1520	190	560	0.50	3.13
	Veta Fátima	170	490	0.35	2.70
	Veta Ruth	212	250	0.40	3.30
Evento 3 San Cristóbal	Veta Split 658	2230	1880	0.40	3.90
	Sector Este, veta 658	800	1460	0.60	4.40
	Veta tensional Sheyla	510	1185	0.30	2.60
	Veta ramal piso 722	780	1249	0.50	2.80
	Veta Leslie	366	520	0.40	2.40
	Veta Diana Sur	400	440	0.40	2.30
	Veta San Cristobalito	1800	770	0.60	2.00
Evento 3 Carahuacra	Veta Lourdes	500	520	0.30	1.45
	Veta ML	1600	1035	0.30	4.00
	Veta Mary	1080	1250	0.50	5.80
	Veta Carmen	240	380	0.25	1.20
Evento 4 San Cristóbal	Sector Oeste veta 658	1800	2090	0.70	6.19
	Veta 722	2880	1790	0.40	4.00
	Veta San Cristóbal	2250	940	0.35	7.00

	Angelita 1	1800	1900	0.20	0.70
	Angelita 2	1800	1900	0.20	0.70
	Angelita 3	1800	1900	0.20	0.70
	Angelita 4	1800	1900	0.20	0.70
	Veta Ferraminas	520	310	0.40	5.00
Evento 4 Carahuacra	Veta Luisa	350	920	0.30	1.20
	Veta Susana	830	1260	0.30	4.40

Anexo 3: Petrografía de las minas San Cristóbal - Carahuacra.

MUESTRA 20102090216. Este: 384542.71, **Norte:** 8703012.3, **Cota:** 4131.43.

PORFIDO DACÍTICO (Subvolcánico San Cristóbal).**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:**

Roca ígnea subvolcánica, compacta, de color gris con tonalidades pardas y blanquecinas. Presenta una textura porfirítica, compuesta por fenocristales de feldespatos y cuarzo primario soportados en una matriz afanítica generalmente de cuarzo. La roca es alterada de forma penetrativa y venillas por agregados de sericita, carbonatos y minerales opacos. Además, la roca es cortada por venilla rellena por cuarzo, también se presenta impregnaciones de limonitas. La roca presenta una dureza media a alta y densidad alta. No muestra un magnetismo y presenta efervescencia al contacto con HCl.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

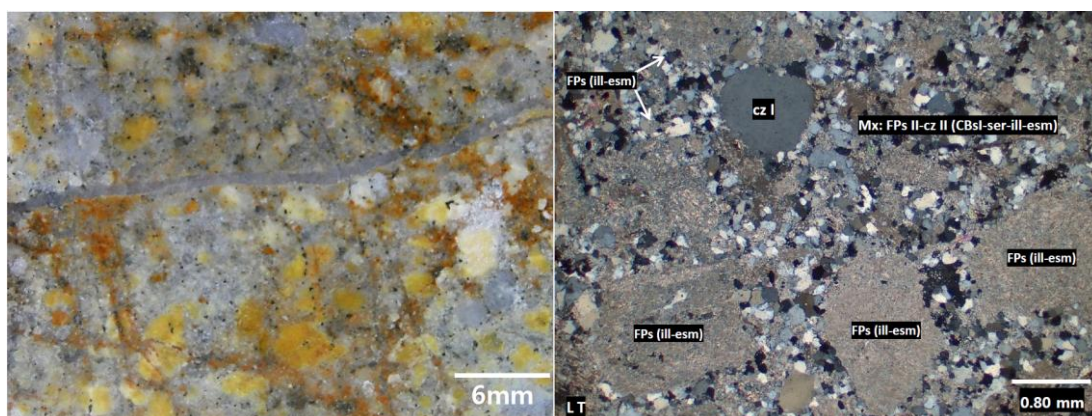
Roca ígnea subvolcánica con textura porfirítica compuesta por moldes de fenocristales de feldespatos, biotita y cuarzo primario, además de minerales accesorios como zircón y apatito. La matriz presenta una textura micro granular, conformada por cristales de cuarzo II y moldes de feldespatos II. La roca presenta un primer evento de venillas rellenas por cuarzo III. Un segundo evento de alteración de forma penetrativa compuesta por agregados de cuarzo IV asociado con muscovita/sericita, carbonatos I, óxidos de titanio y minerales opacos I, estos alteran la matriz y fenocristales. Un tercer evento de forma penetrativa de agregado de illita intercrecida con esmectitas que reemplazan a la sericita/muscovita y feldespatos.

DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA:

MINERALES			TAMAÑO (mm)	%
PRIMARIOS	Matriz	La matriz se muestra moderada a fuertemente alterada, presenta relictos de una matriz microcristalina, conformada por cristales de cuarzo II intercrecida con molde de feldespato II. Soporta a los fenocristales de cuarzo. Biotita y moldes de feldespatos. Es alterada por agregados de cuarzo III asociado con sericita/moscovita, carbonatos y óxidos de titanio.	-	-
		Cuarzo II. Se manifiesta como cristales anhedrales con bordes subredondeados y redondeados, presentan extinción ondulante, intercrecido con los moles de feldespatos II.	-	24
		Plagioclasas II. Se manifiestan como cristales subhedrales y euhedrales de hábitos tabulares y primáticos. Presentan macla polisintética. Impregnados por serpentinas y con algunas inclusiones de magnetita.	≤ 0.04	-
	Fenocristales	Feldespatos. Se hallan como moldes de fenocristales anhedrales con formas subredondeados, algunos muestran aspectos tabulares y prismáticos. Están completamente remplazados por agregados de sericita, illita y esmectitas. Algunos con relictos de carbonatos I.	< 1.4	-
		Biotita (Rutilo). Se manifiestan como relictos de cristales anhedrales con bordes subredondeados, ocasionalmente mantiene su hábito tabular escamosos. Estos muestran inclusiones de rutilo. Están reemplazados por agregados de moscovita	< 1.5	-
		Rutilo. Se halla como cristales anhedrales de aspectos granulares y alguno con hábito acicular. Presentes como inclusiones en algunos cristales de biotita	<0.05	Traza
		Cuarzo I. Se muestran como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados con bordes reabsorbidos por la matriz. Presentan extinción ondulante y recta. Ocasionalmente son corroídos por agregados de sericita.	< 6	5
Accesorios	Zircón. Se exponen como cristales subhedrales y euhedrales de hábito tabular. Presente n la matriz como inclusiones.		<0.12	Traza
	Apatito. Se muestran como cristales anhedrales con bordes subredondeados y subhedrales de hábito tabular. Están dispersos en la matriz y a su vez son corroídos por agregados de sericita/moscovita.		<0.14	Traza

Secundarios	Venillas de cuarzo III. Corresponde a un primer evento de venillas de formas semirrectas, continuas, sin sutura y presenta espesores entre 0.5mm a 3.75mm. Están rellenas por cristales de cuarzo III, presentes con formas anhedrales con bordes irregulares y subredondeados. Presentan extinción ondulante y textura en mosaico.	< 0.8	10
	Agregados de cuarzo IV – moscovita/sericita – carbonatos I – óxidos de titanio – minerales opacos I. Corresponde a un segundo evento, presente de forma penetrativa. También se muestra como microvenillas sinuosas y discontinuas que cortan a las venillas cuarzo III.	-	-
	Cuarzo IV. Se hallan como cristales anhedrales con bordes subredondeados y redondeados, agregados microcristalinos. Presentan extinción ondulante. Están corroyendo parte de la matriz junto a los agregados de sericita.	< 0.08	10
	Muscovita/sericita. Se muestran como cristales subhedrales de hábito tabulares, agregados microcristalinos a criptocristalinos radios y con aspectos escamosos y fibrosos. Estos están reemplazando a los fenocristales de feldespatos I y los feldespatos II. Además, corroe a los cristales de cuarzo II y cuarzo primario.	< 0.12	4
	Carbonatos (Limonitas). Se encuentran como cristales anhedrales con bordes irregulares, agregados microcristalinos criptocristalinos. Estos se muestran impregnados en fenocristales de feldespatos, y dispersos en la matriz relleno intersticios. Asociado con moscovita.	< 0.5	13
	Limonitas. Se hallan como agregados criptocristalinos, estos se muestran impregnados en los agregados de carbonatos.	-	0.5
	Óxidos de titanio. Se halla como cristales anhedrales con bordes irregulares, algunos presentes de hábito tabular. Estos están diseminados en la matriz de roca relleno oquedades e intersticios, intercrecido con minerales opacos I.	<0.2	0.5
	Minerales opacos I. Ocurren como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados. Diseminados en toda la roca e intercrecido con óxidos de titanio, carbonatos I y moscovita. Estos relleno oquedades e intersticios.	<0.4	1

	Agregados de illita – esmectitas. Corresponde a un evento de forma penetrativa, está conformada por agregados de illita, presentes como agregados microcristalinos a criptocristalinos de aspectos fibrosos y escamosos. Están reemplazando a los agregados de muscovita y sericita además de reemplazar parte de los feldespatos. Las esmectitas, presentes como agregados criptocristalinos de aspectos terrosos se muestra intercrecida con los agregados de illita, estos alteran a la illita.	<0.01	31
	Venilla de carbonatos II – minerales opacos II. Corresponde a un último evento de venillas de formas sinuosas e irregulares, sin sutura y continuas a discontinuas. Presenta espesores menores a 0.16mm. Están relleno por cristales de carbonatos II, estos se muestran como agregados microcristalinos. Minerales opacos II (<0.48mm). Se encuentran como cristales anhedrales con bordes irregulares. Presentes de formas puntuales en las venillas.	< 0.3	Traza



Muestra de mano a la izquierda, microfotografía a la derecha.

MUESTRA 20102090222. Este:384405.33, Norte: 8703423.83, Cota: 3799.52

ESQUISTO DE CUARZO – SERICITA (Grupo Excelsior)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

Roca metamórfica, compacta, de color gris claro y con tonalidades pardas claro y estructura foliada y lepidogranoblástica. Está compuesta por bandas de sericita que definen la esquistosidad intercalada con bandas de

cuarzo. Además, presenta microfracturas y espacios intersticiales rellenas por agregados de piritita. Posee densidad media alta y dureza alta. No presenta magnetismo y muestra una tenue efervescencia por zonas puntuales al contacto con HCl.

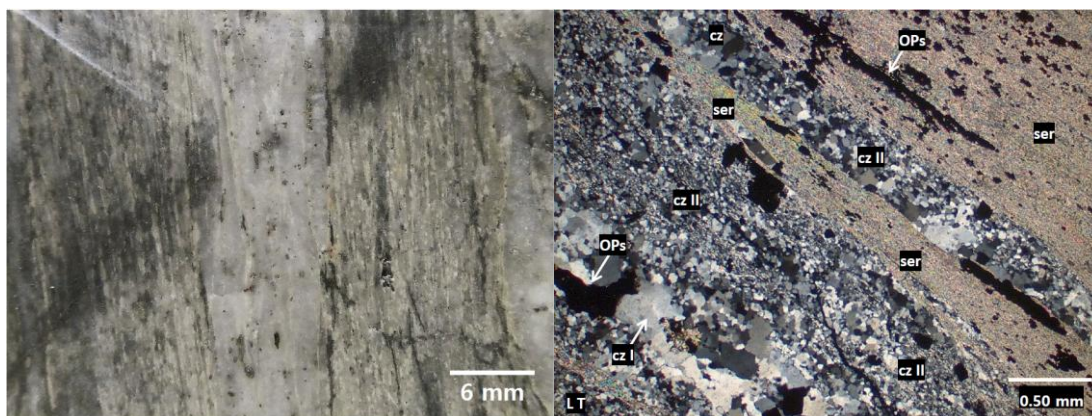
DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

Roca metamórfica, con textura granolepidoblástica. Está compuesta por blastos de cuarzo I y muscovita soportado en una matriz de sericita y cuarzo II, estos generalmente se muestran en bandas de agregados granoblásticos de cuarzo II, intercalados con bandas lepidoblástica de sericita. Además, se tiene presencia de minerales accesorios como rutilo, turmalina y zircón. Presenta un evento de forma penetrativa y en venillas rellena por carbonatos asociado con minerales opacos.

DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA:

MINERALES			TAMAÑO (mm)	%
CRISTALES	Esenciales	Cuarzo I. Se manifiestan como blastos con formas anhedrales con bordes irregulares a angulosos y de formas alargadas. Presentan una fuerte extinción ondulante. Están soportados en la matriz de cuarzo II – sericita. Algunos blastos presentan bordes de recristalización.	< 1.2	2
		Muscovita. Se halla como como cristales subhedrales de hábito tabular y laminares, tenuemente flexurados. Están presentes entre los agregados de sericita y	<0.12	0.5
	Matriz	Cuarzo II. Se exponen como microblastos de formas anhedrales con bordes subangulosos a subredondeados. Presentes extinción ondulante y una textura poligonal. Están presentes entre los intersticios de sericita, así como también forman bandas con texturas granoblásticas.	< 0.1	38

SECUNDARIOS	Accesorios	Sericita. Se desarrollan como cristales subhedrales a euhedrales de hábito tabular y laminares, ocasionalmente flexurados. Presentes en una textura granolepidoblástica formando bandas, por sectores se observan como relictos entre los intersticios de cuarzo II. No muestran crenulación.	< 0.1	55.75
		Rutilo. Se muestran como microblastos de formas irregulares con aspectos granulares. Están presentes de formas diseminada entre los agregados de sericita.	<0.06	0.5
		Zircón. Se muestran como microblastos de formas subredondeados, ocasionalmente fracturados. esta inmersos en los agregados de sericita y concordante a la foliación.	<0.05	Traza
		Apatito. Se muestra microblastos de formas anhedrales con bordes angulosos y deformados alargados. Presentes entre los agregados de sericita.	<0.08	Traza
		Turmalina. Se exponen como microblastos anhedrales con bordes subredondeados, ocasionalmente se observan fracturados. Están dispersos en la matriz entre los agregados de sericita.	<0.06	Traza
		Agregados y venilla de carbonatos – minerales opacos. Corresponde a un evento de forma penetrativa, estos se muestran rellenando espacios intersticiales y oquedades. también esta presentes como venillas sinuosas, discontinuas y sin sutura. Presentan espesores menores a 0.4mm	-	-
		Carbonatos. Se hallan como cristales anhedrales con bordes irregulares, subredondeados y redondeados. Presentes por sectores de la roca rellenando espacios intersticiales. Intercrecido con los minerales opacos.	<0.4	1
		Minerales opacos. Se desarrolló como cristales anhedrales con bordes irregulares, subangulosos y subredondeados, subhedrales a euhedrales de hábito cúbico y rómbico. Estos se muestran intercrecido con los agregados de carbonatos, presentes de forma diseminada en los agregados de sericita y rellenando los planos de foliación, así como los espacios intersticiales en cuarzo.	<0.38	1.5



Muestra de mano a la izquierda, microfotografía a la derecha.

MUESTRA 20102090231. Este: 383224.11, **Norte:** 8704406.02, **Cota:** 4358.41.

CALIZA WACKESTONE (Formación Chambará).

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:

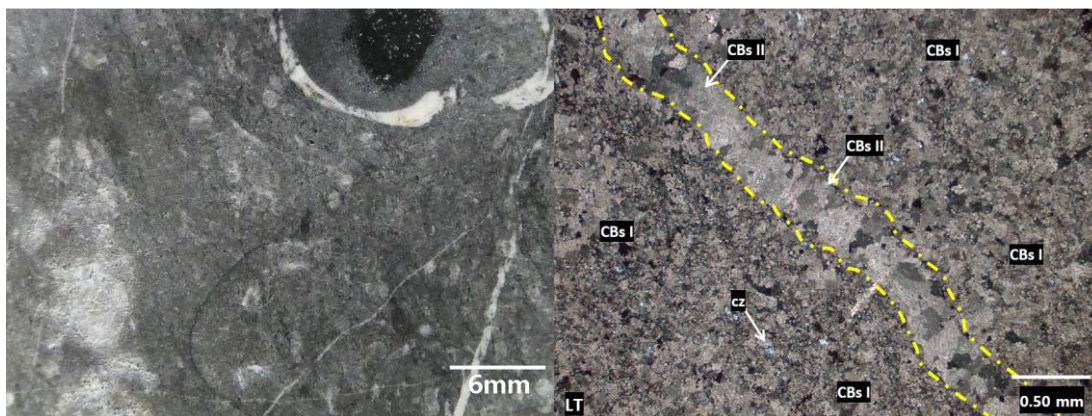
Roca sedimentaria carbonatada, compacta de color gris oscuro y leves tonalidades blanquecinas. Está compuesta por escasos fragmentos bioclastos y granos de cuarzo soportados en una matriz; soportada en agregados cristalinos de carbonatos II. La roca es cortada por venillas rellenas por carbonatos. Además, presenta finas diseminaciones de pirita y esfalerita. No presenta magnetismo y muestra efervescencias al contacto con HCl.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

Roca sedimentaria carbonatada clástica, está compuesta por fragmento de bioclastos y granos de cuarzo, estos se muestran soportados en agregados cristalinos esparítica de carbonatos I, que forman la mayor composición de la roca. La roca presenta un primer evento de alteración de venillas semirrectas rellenas por carbonatos II. Un último evento de forma penetrativa y en venillas, conformada por agregados de cuarzo III asociado con dickita y la mineralización metálica de pirita, marcasita, calcopirita, galena y esfalerita.

DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA:

MINERALES			TAMAÑO (mm)	%
FABRICA /COMPONENTES	Alogénicos	Bioclastos. Fragmentos de conchillas de distintas especies, suelen estar remplazados y rellenos por calcita esparítica; algunos están remplazados también por agregados de arcillas. Corresponden en su mayoría a fragmentos de equinodermos, foraminíferos y gasterópodos.	≤ 15	4
		Cuarzo. Se muestran como granos de formas subredondeados y baja esfericidad. Presentan extinción ondulante, estos son escasos y se encuentran dispersos en la roca.	≤ 0.12	1
	Autígenicos	Carbonatos I. Se muestra como cristales anhedrales con bordes irregulares, subangulosos, algunos subhedrales de hábito romboédrico. Además, se encuentran como reemplazamiento de los bioclastos. Por sectores se muestran como agregados micríticos.	≤ 0.3	85.75
SECUNDARIOS	Venillas de carbonatos II. Corresponde a un primer evento de forma penetrativa, estos se hallan rellenoando espacios intersticiales en la roca, continuas y sin sutura. Presentan espesores entre 0.1mm a 0.6mm. Está rellena de forma masiva por cristales anhedrales con bordes irregulares, angulosos y subangulosos. Presentan extinción ondulante y presentan una textura en mosaico.		< 0.3	1
	Agregados y venillas de cuarzo III – dickita – pirita I – galena I – esfalerita I. Corresponde a un segundo evento de forma penetrativa que rellena espacios intersticiales, también se observan como venillas semirrectas y sinuosas, de formas discontinuas a continuas, sin sutura y con espesores menores a 0.1mm		-	-
	Cuarzo III. Se muestra como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados y redondeados, subhedrales de hábito prismáticos. Estos presentan extinción ondulante y una textura en mosaico. Están presentes en espacios intersticiales y venillas.		< 0.3	3



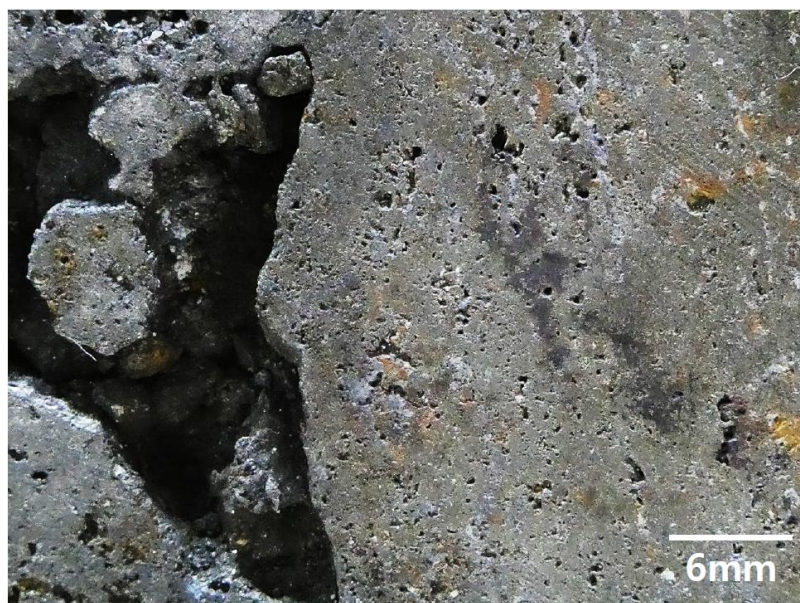
Muestra de mano a la izquierda, microfotografía a la derecha.

MUESTRA 20102090234. Este: 383180.11, Norte: 8704431.38, Cota: 4377.62.

ESTRUCTURA MINERALIZADA DE PIRITA – MAGNETITA +/- ESFALERITA +/- ESPECULARITA +/- GALENA +/- CALCOPIRITA Y CON GANGAS DE CARBONATOS – CUARZO (MANTO).

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:

Estructura mineralizada compacta. Compuesta por dos eventos de relleno: el primero está compuesto por agregados cristalinos de carbonatos con magnetita y pirita. La segunda etapa de relleno está compuesta por agregados cristalinos de aspectos masivo y brechado. Presenta un fuerte magnetismo y muestra una tenue efervescencia de forma puntuales al contacto con HCl.



Muestra de mano.

DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA:

MINERALES		TAMAÑO (mm)	%
ETAPA DE CUARZO – CARBONATOS – OXIDOS – SULFUROS	Relleno de cuarzo III – carbonatos – pirita I – magnetita – especularita – esfalerita I. Corresponde a un primer evento de mineralización, presente de forma masiva.	-	-
	Cuarzo III. Se muestra como cristales anhedrales con bordes irregulares, angulosos y subangulosos, subhedrales a euhedrales de hábito prismático con sección basal hexagonal. Intercrecido con los agregados de carbonatos y la mineralización metálica de pirita I, magnetita y especularita.	< 0.8	4
	Carbonatos. Se desarrollan como cristales anhedrales con bordes irregulares y subangulosos, subhedrales de hábito romboédricos y hojosos, en agregados microcristalinos. Estos se muestran intercrecido con magnetita con amarres de aspecto mirmequítica (1c III) y ameboides (1b I). Además, se muestran impregnados por limonitas.	< 0.8	10
	Pirita I. Se encuentran como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados, subhedrales de hábito cúbico. Están presentes de forma diseminada entre los agregados de carbonatos, magnetita, además estos forman amarre ameboide (1b II).	< 1.6	2.5

ETAPA DE CUARZO – SULFUROS	Magnetita. Se muestran como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados con aspectos granulares, subhedrales de hábito tabular y acicular. Estos se muestran intercrecido con los agregados de carbonatos formando una textura de aspecto mirmequítica (1c III). Además, se muestra reemplazada por especularita.	< 0.3	21.25
	Especularita. Se encuentran como cristales anhedrales con bordes subredondeados, subhedrales a euhedrales de hábito tabular y acicular. Estos en parte se muestran reemplazando a los cristales de magnetita (1b I).	< 0.2	1.5
	Calcopirita I. Se halla como cristales anhedrales con bordes subredondeados y redondeados. Presentes como inclusiones en pirita I (1e I, 1e II).	<0.04	Traza
	Galena. Se muestran como cristales anhedrales con bordes subredondeados. Se hallan en los bordes de algunos cristales de pirita (1b I) así como inclusiones (1e I).	<0.04	Traza
	Esfalerita I. Se muestra como cristales anhedrales con bordes subredondeados. Presentan reflejos internos traslucidos. Están presentes como inclusiones en algunos cristales de pirita I (1e I).		
	Cuarzo IV. Se muestra como cristales anhedrales con bordes subangulosos, subredondeados y redondeados, subhedrales a euhedrales de hábito prismático con sección basal hexagonal. Presentan extinción ondulante y una textura en mosaico. Está intercrecido con carbonatos, pirita y magnetita.	< 1.6	1.5
	Pirita II. Se muestran como cristales anhedrales con bordes irregulares, subredondeados y subangulosos; subhedrales de hábito cúbico y piritoedricos, en agregados cristalinos de formas masiva. Esta intercrecida con magnetita y esfalerita con amarres ameboides (1b I, 1b II, 1b IV), así como también presentan inclusiones de estos (1e I, 1e II).	< 1.2	58
	Calcopirita. Se manifiestan como cristales anhedrales con bordes subredondeados y redondeados. Estos se muestran como inclusiones en algunos cristales de pirita (1e I, 1e II).	< 0.02	Traza

	Esfalerita II. Presentes como cristales anhedrales con bordes irregulares y subredondeados. Presentan reflejos internos traslucidos y rojizos. Está intercrecido con pirita formando amarres ameboides y simples (1b II, 1a I). Algunos cristales se muestran como inclusiones en pirita (1e I), también presenta inclusiones de calcopirita.	< 0.8	Traza
--	---	-------	-------

TEXTURA DE CUARZO – CARBONATOS EN RELLENO HIDROTERMAL:

Cuarzo III: Mosaico.

Cuarzo IV: Mosaico.

Carbonatos: Mosaico.

ALTERACIÓN HIDROTERMAL:

Tipo de Alteración	Estilo	Intensidad	Asociación mineralógica**
Cuarzo – carbonatos	Relleno	Moderada	Magnetita – carbonatos – pirita I - especularita +/- calcopirita I +/- galena +/- esfalerita I
Silicificación	Relleno	Fuerte	Pirita II – cuarzo IV +/- esfalerita +/- calcopirita II

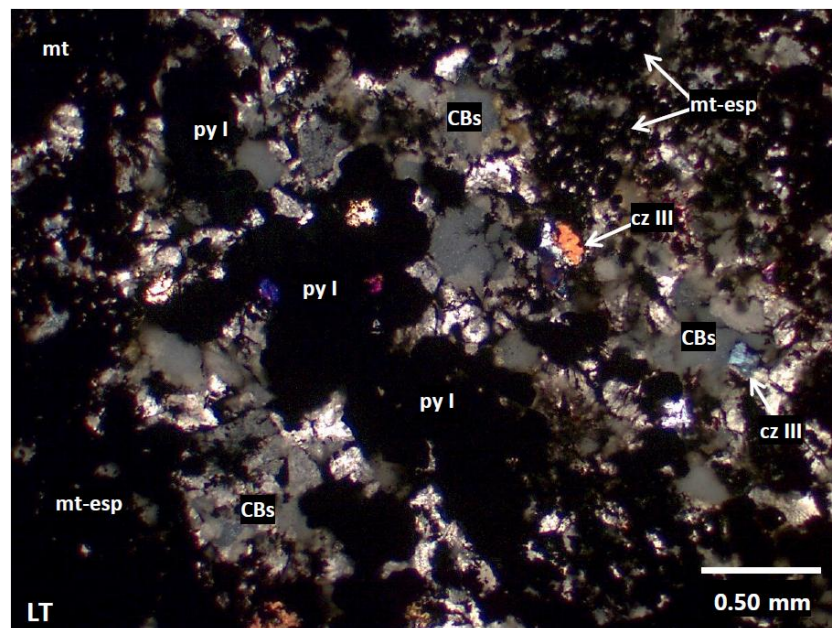
Incipiente (Trazas: < 1%). Débil (1-11%). Moderada (12-49%). Fuerte (>50%)

* El Tipo de alteración hidrotermal está dado en orden por relación temporal.

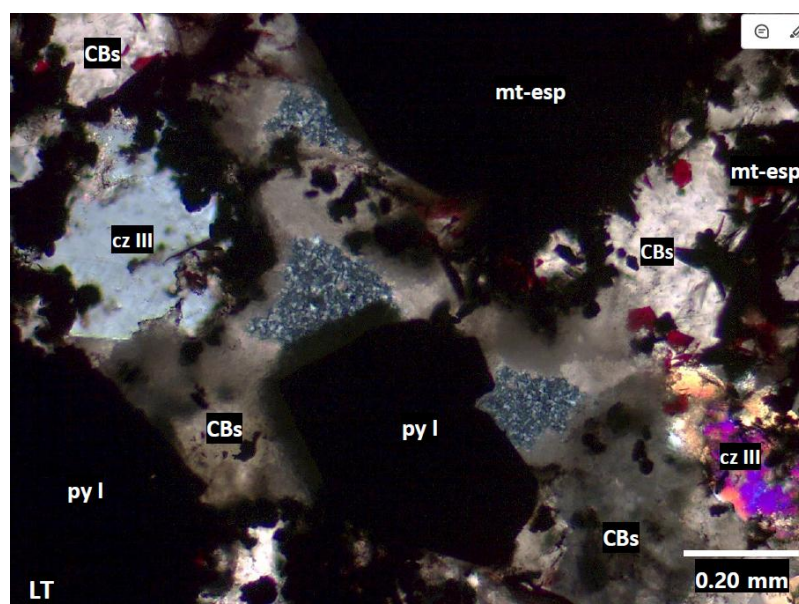
** La asociación de minerales está dada por orden de abundancia e intensidad y no por relación temporal.

POSIBLE SECUENCIA PARAGENÉTICA:

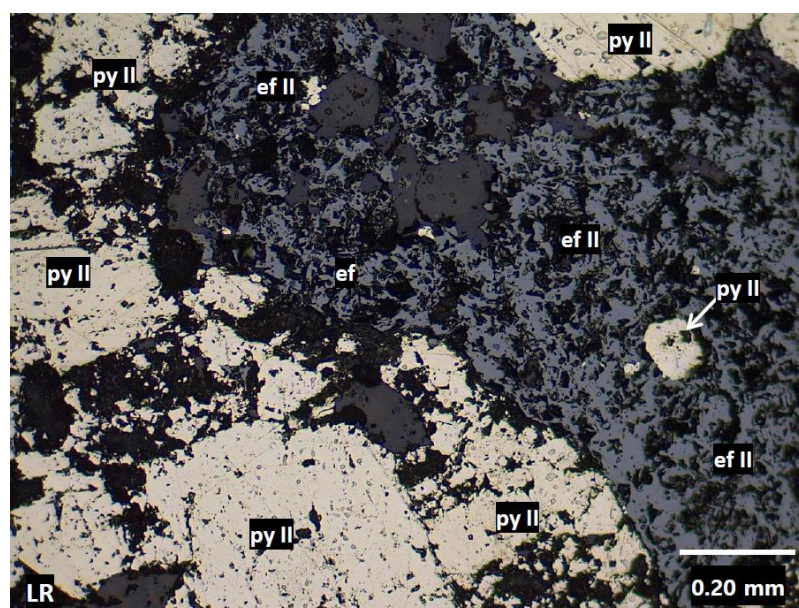
PARAGÉNESIS	EVENTO HIDROTHERMAL
1. Cuarzo III	Etapa de cuarzo – carbonatos – óxidos – sulfuros.
2. Carbonatos	
3. Pirita I	
4. Magnetita	
5. Especularita	
6. Calcopirita I	
7. Galena	
8. Esfalerita I	
9. Cuarzo IV	Etapa de cuarzo –sulfuros
10. Pirita	
11. Calcopirita II	
12. Esfalerita II	



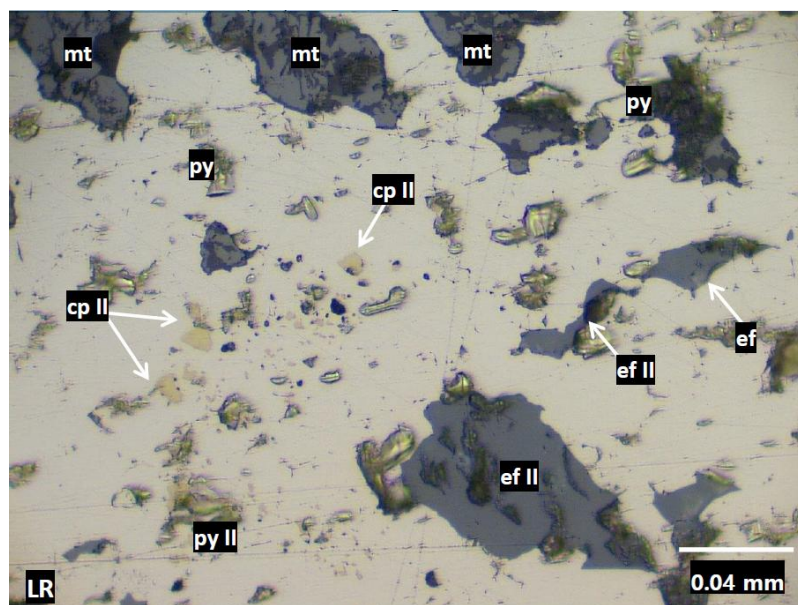
Fotomicrografía 01.- Agregados cristalinos de carbonatos (CBs) con cuarzo III (cz III), pirita I (py I) y agregados de magnetita -especularita (mt-esp). Fotomicrografía en LT-N//.



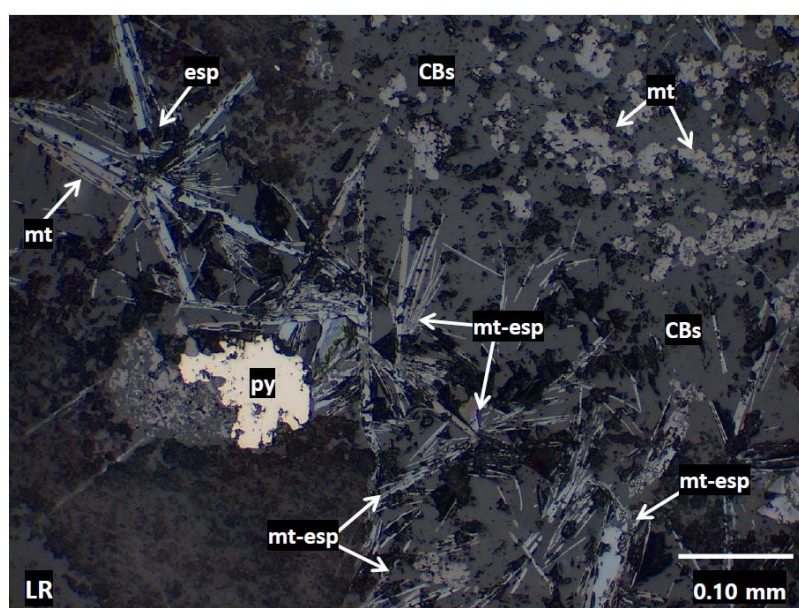
Fotomicrografía 02.- Agregados microcristalinos de carbonatos (CBs) intercrecida con pirita I (py I), magnetita 8mt) y especularita (esp). Fotomicrografía en LT-NX.



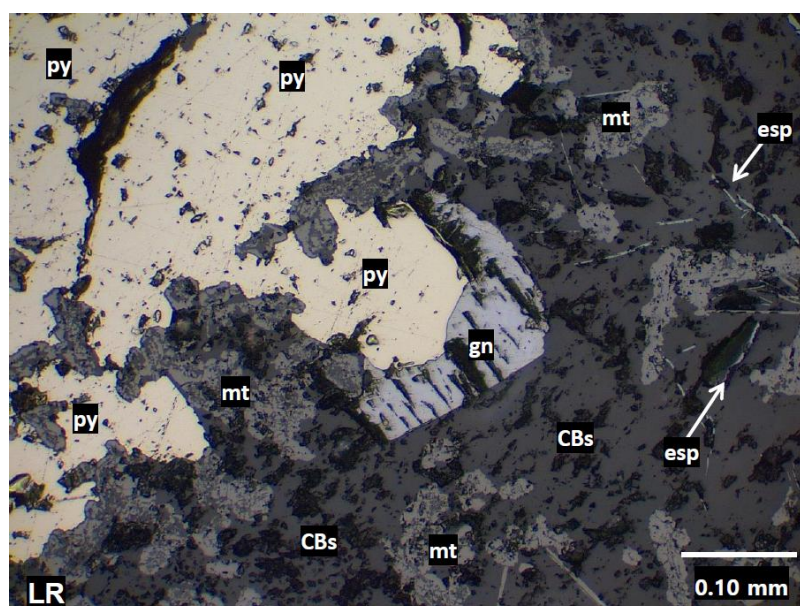
Fotomicrografía 03.- Agregados cristalinos de pirita II (py II) con espacios intersticiales rellenos por esfalerita II (ef II). Fotomicrografía en LR-N//.



Fotomicrografía 04.- Cristal de pirita II (py II) con inclusiones de calcopirita II (cp II) y esfalerita II (ef II). Fotomicrografía en LR-N//.



Fotomicrografía 05.- Cristal de pirita (py) con inclusiones de galena (gn) y esfalerita (ef). Fotomicrografía en LR-N//.



Fotomicrografía 06.- Cristal de pirita (py) con inclusión de sulfosal de plomo (SFsPb) intercrecida con esfalerita (ef). Fotomicrografía en LR-N//.

Anexo 4: Plano geológico y sección de San Cristóbal – Carahuacra.

