



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

Estudio geológico de la veta Pierina, yacimiento minero

Huinac, unidad minera económica administrativa,

“Admirada Atila” Aija - Ancash – Perú

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Jorge Anthony GARRIAZO GONZALES

ASESOR

Dr. Tomas Ezequiel GALLARDAY BOCANEGRA

Lima, Perú

2024



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

Garriazo, J. (2024). *Estudio geológico de la veta Pierina, yacimiento minero Huinac, unidad minera económica administrativa, “Admirada Atila” Aija - Ancash – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jorge Anthony Garriazo Gonzales
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75959474
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-2965-8195
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Tomas Ezequiel Gallarday Bocanegra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08009915
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1055-4237
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Ciro Sergio Bedia Guillen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06130412
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Andrés Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Pedro Antonio Olivares Ballena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06085689

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.14. Geología Aplicada a la Ingeniería
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Aija Distrito: La Merced Latitud: -9.696431 Longitud: -77.685534
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022 - 2024
URL de disciplinas OCDE	Geología http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geociencias, Multidisciplinar http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 Minería, Procesamiento de minerales http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el jueves 16 de mayo del año 2024 siendo las 4:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

Dr. Ciro Sergio Bedia Guillen	(Presidente de Jurado)
Ing. Pedro Antonio Olivares Ballena	(Miembro de Jurado)
Mg. José Andrés Yparraguirre Calderón	(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público a colación de la Tesis del Bach. **Jorge Anthony Garriazo Gonzales**, quien sustentará la Tesis titulada: **"ESTUDIO GEOLÓGICO DE LA VETA PIERINA, YACIMIENTO MINERO HUINAC, UNIDAD MINERA ECONÓMICA ADMINISTRATIVA, "ADMIRADA ATILA" AIJA - ANCASH – PERÚ"**; su asesor el docente, **Dr. Gallarday Bocanegra Tomas Ezequiel**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A Satisfacción del Jurado

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

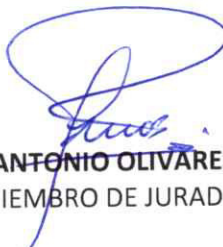
Diecisiete (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga: Se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. Jorge Anthony Garriazo Gonzales.

Siendo las 17:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 16 de mayo del 2024


DR. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN
PRESIDENTE DE JURADO


ING. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA
MIEMBRO DE JURADO


MG. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
MIEMBRO DE JURADO


DR. GALLARDAY BOCANEGRA TOMAS EZEQUIEL
MIEMBRO ASESOR



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Tomás Ezequiel Gallarday Bocanegra en mi condición de **asesor acreditado** con la Resolución Decanal N°...000398-2024..... de la **tesis**, cuyo título es:

Estudio geológico de la veta Pierina, yacimiento minero Huinac, Unidad minera económica administrativa, "Admirada Atila" Aija - Ancash – Perú.

Presentado por el Bachiller, de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica: Garriazo Gonzales, Jorge Anthony, para optar el Título profesional de Ingeniero Geólogo

CERTIFICO:

Que ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajo Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 14 % de similitud evidenciada en la página 113 del texto, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas legales vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título en la especialidad de GEOLOGIA

Lima 15 de mayo del 2024.

Firma del Asesor

DNI: 08009915

Tomás Ezequiel Gallarday Bocanegra

Nombres y apellidos del asesor:



Dedicatoria

A mis queridos padres Precilio Garriazo y
Josefina Gonzales, por su apoyo incondicional,
su paciencia y su gran afecto, quienes han forjado
el camino para poder ser un profesional.

A mis hermanos, amigos y todas las personas
que siempre están presentes en mis triunfos y mis
derrotas, gracias por el apoyo y comprensión
brindado.

Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. Tomás Gallarday, por apoyarme, orientarme y aconsejarme para desarrollar esta investigación.

A la empresa minera Huinac, por permitirme colaborar en sus proyectos y dejarme usar su información para la realización de este proyecto.

Al equipo de geología de minera Huinac, por apoyarme en distintos asuntos de esta tesis.

A todos mis colegas que aportaron con sus ideas para poder desarrollar y culminar esta investigación.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue llevar a cabo un estudio geológico de la veta Pierina, en el yacimiento minero Huinac, para ello se realizó la búsqueda, recopilación, evaluación y validación de información esencial para este estudio, posteriormente se efectuó los trabajos en campo y gabinete determinando así las características geológicas como la litología, estructuras geológicas, geoquímica y mineralogía. Tras analizar la información anterior y compararla con las características de otros yacimientos similares, como las vetas polimetálicas del distrito minero de Morococha, el proyecto La Tapada en Carhuacayán, el proyecto Zoraida en Andaychagua, entre otros, se concluyó que la veta Pierina se caracteriza por ser una estructura con contenido mineral polimetálico (Ag-Zn-Pb-Cu) con características de baja a intermedia sulfuración, cuya roca encajonante está representada por pizarras con un metamorfismo con grado bajo a moderado y andesitas porfiríticas, además el comportamiento geoquímico y mineralógico indica que existe un zoneamiento central representado por minerales de cobre y plata al norte de la veta y un zoneamiento en las partes medias y distales representado por minerales de zinc, plomo y plata, al sur de la veta, a su vez también se determinó que la veta Pierina pertenecería a un yacimiento del tipo Butte o denominado también Cordillerano, cuyos eventos mineralizantes fueron: una etapa temprana con características de baja sulfuración, una segunda etapa caracterizada principalmente por la presencia de pirita y una etapa final con características de intermedia sulfuración y fuerte presencia de minerales de zinc, plomo, plata y cobre, cabe recalcar que esta última etapa es económicamente más importantes que la anteriores.

La información presentada anteriormente permite indicar que al norte de la veta Pierina existe un mayor potencial de recursos minerales. Esto se debe a que la zona norte constituye el centro del sistema cordillerano presente en el yacimiento minero Huinac.

ABSTRAC

The objective of this research was to carry out a geological study of the Pierina vein in the Huinac mining deposit. To achieve this, the essential information for this study was sought, collected, evaluated, and validated. Subsequently, field and laboratory work were carried out, determining the geological characteristics such as lithology, geological structures, geochemistry, and mineralogy. After analysing the aforementioned information and comparing it with the characteristics of other similar deposits, such as the polymetallic veins in the Morococha mining district, La Tapada project in Carhuacayán, the Zoraida project in Andaychagua, among others, it was concluded that the Pierina vein is characterized by being a structure with polymetallic mineral content (Ag-Zn-Pb-Cu) with features of low to intermediate sulfidation. The host rock is represented by slates with a low to moderate metamorphism and porphyritic andesites. Additionally, the geochemical and mineralogical behaviour indicates a central zoning represented by copper and silver minerals to the north of the vein, and zoning in the middle and distal parts represented by zinc, lead, and silver minerals to the south of the vein. It was also determined that the Pierina vein belongs to a deposit of the Butte type, also known as Cordilleran, whose mineralizing events were an early stage with characteristics of low sulfidation, a second stage characterized mainly by the presence of pyrite, and a final stage with characteristics of intermediate sulfidation and a strong presence of zinc, lead, silver, and copper minerals. It is noteworthy that this last stage is economically more significant than the previous ones.

The information presented above indicates that to the north of the Pierina vein, there is a greater potential for mineral resources. This is due to the fact that the northern zone constitutes the centre of the cordilleran system present in the Huinac mining deposit.

INDICE

1. CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.1. Situación problemática	12
1.2. Formulación de los problemas	12
1.2.1. General.	12
1.2.2. Específicos.	12
1.3. Justificación de la Investigación	13
1.3.1. Práctica.	13
1.3.2. Teórica.	13
1.4. Objetivos de esta Investigación	14
1.4.1. General.	14
1.4.2. Específicos.	14
2. CAPÍTULO II. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO	15
2.1. Antecedentes históricos	15
2.2. Localización	17
2.3. Accesibilidad	17
2.4. Relieve y Drenaje	19
2.5. Clima y Vegetación	19
2.6. Geología Económica	20
3. CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	21
3.1. Bases Teóricas	21
3.1.1. Sistema pórfido magmático-hidrotermal.	21
3.1.2. Depósitos Cordilleranos o tipo “Butte”.	23
3.1.3. Evolución del estado de sulfuración	32
3.1.4. Alteraciones hidrotermales	35
3.2. Ejemplos de otros yacimientos similares	39
3.2.1. La Tapada - Carhuacayán	39
3.2.2. Proyecto Zoraida - Andaychagua	41
3.2.3. Distrito minero de Morococha	43
3.3. Marco Conceptual	45
3.4. Marco Legal	49

3.4.1. Constitución Política del Perú	49
3.4.2. Estatuto de la UNMSM, 2016	50
4. CAPÍTULO IV. HIPÓTESIS Y VARIABLES	52
4.1. Hipótesis	52
4.1.1. General	52
4.1.2. Específicas	52
4.2. Identificación de Variables	52
4.2.1. Independiente	52
4.2.2. Dependiente	52
5. CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
5.1. Enfoque, Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación	53
5.2. Desarrollo de la Investigación	53
5.2.1. Recopilación de información	53
5.2.2. Trabajos hechos en campo	53
5.2.3. Elaboración de planos y análisis e interpretación de los datos planteados	54
6. CAPÍTULO VI. GEOLOGÍA REGIONAL	55
6.1. Estratigrafía	55
6.1.1. Facies Sedimentarias	55
6.1.2. Facies Volcánicas	58
6.2. Rocas intrusivas	62
6.2.1. Stock de Pira	63
6.2.2. Stock de Huanchay	63
6.2.3. Stocks de Huacllan y Huayán	63
6.2.4. Stock Mina Huinac	64
6.2.5. Stocks de Aija - Recuay	64
6.2.6. Lincuna, C° Sillagash y Mina Boliche	64
6.2.7. Depósitos Cuaternarios	65
6.3. Marco Tectónico – Estructural	65
6.3.1. Deformación durante el Cretácico y el Paleógeno-Neógeno	65
6.3.2. Zona de rocas volcánicas del Calipuy con plegamiento suave	66
6.3.3. Fallas y Fracturas	66

7. CAPÍTULO VII. GEOLOGÍA LOCAL	68
7.1. Estratigrafía	68
7.1.1. Pizarra con metamorfismo de bajo grado	68
7.1.2. Pizarras y filitas con metamorfismo de grado medio	68
7.1.3. Aglomerados volcánicos	69
7.1.4. Brechas piroclásticas	69
7.2. Rocas Plutónicas	70
7.2.1. Pórfido andesítico	70
7.3. Geología estructural	71
7.3.1. Sistema Huinac Norte	71
7.3.2. Sistema Huinac Oeste	71
7.3.3. Sistema Huinac Este	71
7.3.4. Fallas, fracturas y pliegues	73
8. CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS GEOQUÍMICO	74
8.1. Análisis Exploratorio de Datos y Prueba de Normalidad	74
8.1.1. Análisis Estadístico de la Zona Sur	75
8.1.2. Análisis Estadístico de la Zona Centro	76
8.1.3. Análisis Estadístico de la Zona Norte 1	77
8.1.4. Análisis Estadístico de la Zona Norte 2	78
8.2. Correlación Bivariada	79
8.2.1. Análisis correlacional bivariado de la Zona Sur	80
8.2.2. Análisis correlacional bivariado de la Zona Centro	81
8.2.3. Análisis correlacional bivariado de la Zona Norte 1	82
8.2.4. Análisis correlacional bivariado de la Zona Norte 2	83
8.3. Planos geoquímicos	84
9. CAPÍTULO IX. ANÁLISIS MINERALÓGICO, ALTERACIONES Y BRECHAS	87
9.1. Análisis Macroscópico	87
9.1.1. Análisis Macroscópico de la Zona Sur	87
9.1.2. Análisis Macroscópico de la Zona Centro	89
9.1.3. Análisis Macroscópico de la Zona Norte 1	91
9.1.4. Análisis Macroscópico de la Zona Norte 2	93

9.2. Análisis minerográfico	96
10. CAPÍTULO X. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
10.1. Geología del yacimiento	99
10.2. Paragénesis mineral y estadios de mineralización	100
10.3. Zonación mineralógica	102
11. CAPÍTULO XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
11.1. Conclusiones	105
11.2. Recomendaciones	106
12. CAPÍTULO XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
13. CAPÍTULO XIII. ANEXOS	113
13.1. Anexo I. Análisis Petrológico	113
13.2. Anexo II. Alteraciones hidrotermales	116
13.3. Anexo III. Análisis minerográfico	117
13.4. Anexo IV. Análisis exploratorio de datos	123

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.* Mapa de ubicación del área de estudio. Representa las concesiones mineras de la UEA Admirada Atila. Mapa redibujado por el autor con datos de INGEMMET. 18
- Figura 2.* Mapa de accesibilidad del área de estudio. Muestra la ruta de accesibilidad desde Huaraz a la UEA Admirada Atila. Mapa redibujado por el autor con datos de INGEMMET. 18
- Figura 3.* Posición esquemática de los depósitos cordilleranos y otros tipos de yacimientos en un sistema pórfido. Tomado de “Cordilleran or Butte-type Veins and Replacement Bodies as a Deposit Class in Porphyry Systems” por L. Fontboté y R. Bendeزú, 2009. 23
- Figura 4.* Zoneamiento metálico en el distrito minero de Morococha, donde se tiene una zona central rica en cobre (Cu), una zona intermedia de zinc-cobre (Zn-Cu) y zonas exteriores de zinc-plomo-plata (Zn-Pb-Ag) y plomo-plata (Ag-Pb). Tomado de “Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned cordilleran base metal district, Morococha, central Peru” por H. Catchpole et al., 2012. 26
- Figura 5.* Zonación idealizada en el depósito de Cerro de Pasco, se tiene una zona central rica en cobre (Cu), una zona intermedia de zinc-cobre (Ag-Bi) y zonas exteriores de zinc-plomo-plata (Zn-Pb) y carbonatos. Tomado de “Mineral Zoning and Geochemistry of Epithermal Polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi Mineralization at Cerro de Pasco, Peru” por R. Baumgartner et al., 2008. 27
- Figura 6.* Paragénesis mineral generalizada de las vetas polimetálicas cordilleranas. Tomado de “Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru” por H. Catchpole et al., 2015. 28

- Figura 7.* Estadios de mineralización típicos en depósitos cordilleranos, se tiene estadios A, B y C. Tomado de “Mineralization stages at the Ayawilca Zn-Pb-In-Ag-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru: new insights.” por M. Uzieda et al., 2020. 29
- Figura 8.* Evolución del sistema pórfido donde se forman distintos tipos de yacimientos como pórfidos, skarns, epitermales y cordilleranos. Tomado y editado de “Zinc, Lead, Silver in Porphyry Systems from Byproducts to World Class Deposits” por L. Fontboté, 2012. 31
- Figura 9.* Diagrama log fS2 - 1000/T que define el estado relativo de sulfuración de los fluidos hidrotermales y la trayectoria evolutiva de los fluidos en los yacimientos de cobre porfirítico, vetas polimetálicas relacionadas con pórfidos y depósitos epitermales de oro-plata en términos de una serie de posibles trayectorias de enfriamiento. Tomado de “Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments” por M. Einaudi et al., 2003. 33
- Figura 10.* Diagrama log fS2 - 1000/T, define el estado relativo de sulfuración de los fluidos hidrotermales y la trayectoria evolutiva de los fluidos en los yacimientos de vetas polimetálicas relacionadas con pórfidos y depósitos epitermales en términos de una serie de posibles trayectorias de enfriamiento. Tomado de “Mineral Zoning and Geochemistry of Epithermal Polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi Mineralization at Cerro de Pasco, Peru” por R. Baumgartner et al., 2008. 35
- Figura 11.* Modelo 3D de estadios de mineralización en el yacimiento La Tapada - Carhuacayán. Tomado de “Estadios de mineralización en La Tapada, yacimiento cordillerano polimetálico, Carhuacayán, Perú Central: su aplicación para modelar recursos y definir nuevos targets de exploración” por R. Bernaola et al., 2019. 40
- Figura 12.* Estadios de mineralización del proyecto Zoraida. Tomado de “Principales estadios de mineralización del yacimiento polimetálico tipo cordillerano, proyecto Zoraida-U.P. Andaychagua, Volcan Compañía Minera S.A.A. Junín - Perú” por R. Supa, 2021. 42
- Figura 13.* Muestra de una veta polimetálica cordillerana bien zonada con cuarzo-pirita y etapa de metales base, que incluye varios subestadios; el esquema muestra las principales zonas minerales con sus respectivas asociaciones minerales. Ccp representa la calcopirita, Eng la enargita, Gn la galena, Py la pirita, Qz el cuarzo, Rds la rodocrosita, Sp la esfalerita, Tnt la tenantita y Ttr la tetrahedrita. Tomado de “Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru” por H. Catchpole et al., 2015. 44
- Figura 14.* Mapa geológico del área de estudio. Muestra las unidades geológicas correspondientes a la zona de estudio. Mapa redibujado del INGEMMET. 61
- Figura 15.* Tabla cronoestratigráfica de la zona de estudio. Muestra la relación cronoestratigráfica de las unidades geológicas del área de estudio. Redibujado por el autor del INGEMMET. 61
- Figura 16.* Mapa geológico estructural de la zona de estudio. Presenta las estructuras geológicas del área de estudio. Redibujado por el autor del INGEMMET. 67
- Figura 17.* Muestra de una pizarra con metamorfismo de bajo grado. 69
- Figura 18.* Muestra de una pizarra con metamorfismo grado medio. 69
- Figura 19.* Muestra de una brecha piroclástica. 70
- Figura 20.* Muestra de un pórfido andesítico. 70
- Figura 21.* Estrías de falla y alteración argílica en el contacto entre la veta-falla y la roca caja. 72
- Figura 22.* Falla de rumbo sinistral (izquierda) rellenada por carbonatos. 72
- Figura 23.* Sistemas de vetas de la zona de estudio. Algunas de ellas afloran en superficie del área de estudio. Elaborado por el autor. 72

- Figura 24.* Mapa geológico local de la zona de estudio. Representa las formaciones geológicas y las estructuras presentes en el área de estudio. Elaborado por el autor. 73
- Figura 25.* Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Sur. Elaborado por el autor. 80
- Figura 26.* Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Centro. Elaborado por el autor. 81
- Figura 27.* Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Norte 1. Elaborado por el autor. 82
- Figura 28.* Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Norte 2. Elaborado por el autor. 83
- Figura 29.* Mapa geoquímico de la veta Pierina en los distintos niveles de la mina, se muestra los cuatro dominios o zonas geoquímicas establecidas. Elaborado por el autor. 84
- Figura 30.* Comportamiento geoquímico de la plata (Ag) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor. 85
- Figura 31.* Comportamiento geoquímico del cobre (Cu) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor. 85
- Figura 32.* Comportamiento geoquímico del plomo (Pb) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor. 86
- Figura 33.* Comportamiento geoquímico del zinc (Zn) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor. 86
- Figura 34.* Veta de 30 cm, muestra bandas de galena, esfalerita, pirita y carbonatos. Se presenta alteración argílica, el halo de alteración de la veta llega a medir hasta 10 cm. 88
- Figura 35.* Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y las bandas claras por calcita. 88
- Figura 36.* Muestra extraída para análisis, se observa bandeamiento de sulfuros (esfalerita, galena y pirita). 89
- Figura 37.* Vetilla de cristales romboédricos de calcita y rodocrosita, los cuales llegan a medir hasta dos centímetros, la mayoría de cristales tienen las caras incompletas. 89
- Figura 38.* Veta de 60 cm, muestra bandas de sulfuros y carbonatos. Se presenta alteración argílica intermedia. 90
- Figura 39.* Texturas coloformes, crustiformes formadas por bandas concéntricas, las cuales alternan entre calcita y marmatita. 90
- Figura 40.* Brecha clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena. 91
- Figura 41.* Muestra extraída para análisis, se observa bandeamiento de sulfuros (esfalerita, galena y pirita), también se tiene texturas crustiforme en la parte izquierda de la muestra formadas entre cristales de galena y carbonatos. 91
- Figura 42.* Veta con bandas de esfalerita y galena en los bordes mientras que la banda de pirita se presenta al medio. 93
- Figura 43.* Vetillas de carbonatos cortando transversalmente a la veta principal, a su vez estas vetillas actúan con falla sinistral. 93
- Figura 44.* Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y las bandas claras por calcita. También se puede observar geodas. 93
- Figura 45.* Muestra extraída para análisis, se observa banda de galena y esfalerita a la izquierda mientras que a la derecha la banda de pirita, la cual contiene también sulfosales. 93

<i>Figura 46.</i> Veta con bandas de esfalerita y galena en los bordes mientras que la banda de pirita se presenta al medio, se aprecia poca alteración en la roca encajonante.	95
<i>Figura 47.</i> Alteración en el contacto entre la veta y la roca caja constituida por arcillas y diseminaciones de pirita y algunos óxidos producidos por el contacto con el agua.	95
<i>Figura 48.</i> Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y galena y las bandas claras por calcita.	95
<i>Figura 49.</i> Muestra de mano extraída para análisis, se observa esfalerita, galena y sulfosales diseminadas en pirita.	95
<i>Figura 50.</i> Secuencia paragenética de la zona centro.	96
<i>Figura 51.</i> Secuencia paragenética de la zona norte.	98
<i>Figura 52.</i> Secuencia paragenética de la zona norte.	98
<i>Figura 53.</i> Secuencia paragenética de las vetas polimetálicas de Morococha a la derecha y a la izquierda los estadios del proyecto Zoraida - Carhuacayán.	101
<i>Figura 54.</i> Secuencia paragenética y estadios reconocidos de la veta Pierina - Huinac. Elaborado por el autor.	101
<i>Figura 55.</i> Muestra de la veta Pierina, se aprecia las etapas de cuarzo-pirita y etapa de metales base, que incluye varias subetapas y la etapa de carbonatos. Elaborado por el autor.	102
<i>Figura 56.</i> Comparación de la zonación mineralógica entre las vetas polimetálicas de Morococha y la veta Pierina del yacimiento minero Huinac.	103

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de la zona de estudio.	17
Tabla 2. Ruta de accesibilidad a la zona de estudio.	19
Tabla 3. Resumen del procesamiento de datos de la Zona Sur.	75
Tabla 4. Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Sur.	75
Tabla 5. Resumen del procesamiento de datos de la Zona Centro.	76
Tabla 6. Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Centro.	76
Tabla 7. Resumen del procesamiento de datos de la Zona Norte 1.	77
Tabla 8. Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Norte 1.	77
Tabla 9. Resumen del procesamiento de datos de la Zona Norte 2.	78
Tabla 10. Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Norte 2.	78
Tabla 11. Rango de valores para los niveles de correlación.	79
Tabla 12. Matriz de correlación de Pearson de la zona Sur.	80
Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson de la zona Centro.	81
Tabla 14. Matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 1.	82
Tabla 15. Matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 2.	83
Tabla 16. Comparación de yacimientos cordilleranos con la veta Pierina.	99

1. CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Situación problemática

El yacimiento minero Huinac, propiedad de minera Huinac SAC, se encuentra actualmente en explotación, por ello los recursos de minerales con elementos metálicos se están agotando progresivamente, por lo tanto, emerge la necesidad de localizar y estimar recursos adicionales, con el fin de prolongar el rango de explotación de la mina y así continuar con los compromisos de venta internacionales ya adquiridos por la empresa.

Sin embargo, a la fecha no existen trabajos de investigación geológica detallados acerca de las vetas mineralizadas, entre ellas la estructura vetiforme Pierina, la cual tuvo y tiene la mayor producción de sulfuros con sustancias metálicas; por ello emerge la necesidad de realizar la presente investigación sobre dicha veta, orientada a dar aportes acerca de su litología, posición estructural, geoquímica, y su ensamble mineralógico, lo cual ayudará a conocer e interpretar sus fases mineralizantes, su génesis, tipo de yacimiento y la localización de sus potenciales recursos.

1.2. Formulación de los problemas

1.2.1. General.

- ¿Puede el estudio geológico de la veta Pierina en el yacimiento minero Huinac, unidad económica administrativa (UEA) Admirada Atila, ubicada en Aija, Ancash, Perú, contribuir a la expansión de la exploración geológica y posterior explotación?

1.2.2. Específicos.

- ¿Cuál es la tendencia geológica, litoestructural, geoquímica y mineralógica, de la veta Pierina?

- ¿Es la relación geológica, mineralógica, geoquímica y litoestructural los que ayudarán a definir los eventos hidrotermales, el origen y tipo de yacimiento al cual pertenece la veta Pierina?

- ¿La determinación de las características geológicas y el tipo de yacimiento al cual pertenece la veta Pierina nos ayudará definir las zonas para realizar la exploración geológica?

1.3. Justificación de la Investigación

1.3.1. Práctica.

En el mercado internacional el precio de los metales cada vez se incrementa, dado por su demanda; lo que se hace necesario descubrir nuevas áreas y nuevas vetas para adicionar a las reservas y recursos minerales en la UEA Admirada Atila.

La UEA Admirada Atila está en proceso de expansión en su explotación; Por eso es necesario llevar a cabo investigaciones de exploración geológica que nos aporten detalles acerca del comportamiento geológico de las vetas ya reconocidas y de las vetas que aún están por descubrir tanto lateralmente como a profundidad.

Este estudio aportará información geológica, en la cual se dará una visión más amplia acerca de los controles geológicos, litológicos, estructurales, geoquímicos y mineralógicos, y con ello se podrá reconocer e interpretar las fases mineralizantes, génesis, tipo de yacimiento y la localización de los potenciales recursos de la veta Pierina.

1.3.2. Teórica.

Este estudio geológico puede utilizarse como una guía para ampliar el conocimiento geológico o realizar otros con mayor detalle y amplitud en las vetas del yacimiento minero Huinac en la unidad económica administrativa Admirada Atila y también en otras unidades mineras con características similares, a su vez ayudará a las personas que busquen incrementar sus conocimientos con respecto al tema u otros similares.

1.4. Objetivos de esta Investigación

1.4.1. General.

-Realizar un estudio geológico de la veta Pierina, en el yacimiento minero Huinac, unidad económica administrativa Admirada Atila, Aija, Ancash, Perú.

1.4.2. Específicos.

-Efectuar la geología local que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía de la veta Pierina, que ayudará a orientar la exploración geológica.

-Correlacionar litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía para determinar las fases mineralizantes, génesis y tipo de yacimiento al cual pertenece la veta Pierina.

-Recomendar la exploración geológica sobre el rumbo de la veta Pierina.

2. CAPÍTULO II. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Antecedentes históricos

La explotación del yacimiento minero Huinac fue realizada por españoles y portugueses hasta 1830, cuando cesaron las operaciones debido a las hostilidades generadas por la proclamación de la Independencia del Perú. Más tarde, el yacimiento pasó a manos de los señores Cáceres (Ludovico y Emiliano), quienes mantuvieron una producción de 10,000 TM/mes. Años más tarde la Compañía Minera "Santa Elena" de Mauricio Hochild adquirió los derechos mineros de los señores Cáceres en 1938 y comenzó a estudiar y operar el yacimiento con una producción de 130,000 a 160,000 TM por día. Alrededor de dos años más tarde, la mina fue abandonada, luego denunciada por varios pequeños mineros. En 1965, Raúl Vizcarra Alvares adquirió la concesión de los pequeños mineros, estableciendo la empresa minera Huaraz, que operó con una producción de 30,000 TM por día. En 1999-2000, la empresa cambió su razón social y se constituyó como Minera Huinac S.A.C. nombre actual que lleva la compañía (Velarde, 2012).

En el año 1957, Bodenlos, A. y Straczek, J. realizaron la publicación de un trabajo de investigación en el boletín N° 1040 del Servicio Geológico de los Estados Unidos denominado: "Base-Metal Deposits of the Cordillera Negra Departamento de Ancash, Perú" donde dan a conocer las primeras investigaciones acerca de las características geológicas de la Cordillera Negra, abarcando las características estratigráficas, estructurales, metalogénicas y un análisis detallado de los yacimientos y prospectos mineros presentes en la cordillera Negra.

En 2010, Villarreal, E.; Rivera, R. y Santisteban, A. (INGEMMET) publicaron un trabajo de investigación como parte del XV Congreso de Geología denominado: "Características metalogenéticas de la cordillera Occidental en la región Áncash" en donde realizan un análisis de

las características geológicas-tectónicas del sector y con ello definen franjas metalogenéticas en la Cordillera Negra y Cordillera Blanca.

En 2010, Chavez, L.; Navarro, P.; Rodríguez, F. y Martiarena, R. (INGEMMET) publicaron un trabajo de investigación como parte del XV Congreso de Geología llamado: “Estratigrafía volcánica del grupo Calipuy (vulcanismo cenozoico) - sector norte del segmento cordillera Negra, región Ancash” donde describen la presencia de centros eruptivos y las etapas volcánicas que modelaron el área de estudio, asignando también el posible rango de edad del vulcanismo ocurrido en este sector de la cordillera negra.

En 2012, Velarde, M. presentó el informe de suficiencia denominado: “Prospección geológica y geoquímica del diseminado polimetálico Huinac - La Merced - Aija - Ancash” en el cual da a conocer los análisis y resultados de la prospección geológica realizada en un diseminado polimetálico adyacente a la zona de estudio de esta investigación (la cual incluyó una primera campaña de perforación diamantina) proponiendo nuevos targets de exploración.

En 2017, Carrasco, D. realizó su tesis denominada: “Caracterización geológica y distribución geoquímica en el diseminado polimetálico Huinac” en el cual hace una reinterpretación de la data existente de la primera campaña de perforación diamantina y realiza una segunda campaña de perforación, obteniendo así mayor información acerca de las características geológicas del diseminado polimetálico.

En 2021, Gonzales, J. presentó su informe de tesis denominado: “Análisis tectónico y estructural del volcánico Calipuy en la cordillera Negra (Ancash) mediante el uso de software libre” donde expone las características tectónicas, estructurales, petrológicas y geoquímicas del sector ubicado entre la ciudad de Huaraz y la localidad de Chacchan, en la región de Ancash, la zona estudiada incluye el área donde se encuentra el yacimiento minero Huinac.

2.2. Localización

El yacimiento minero Huinac pertenece a la Unidad Económica Administrativa (UEA) Admirada Atila, la cual se ubica en el paraje Huinac S/N, en el distrito de La Merced, en la provincia de Aija, perteneciente al departamento de Ancash, aproximadamente a 280 kilómetros (en línea recta) al norte de la ciudad de Lima y a unos 25 kilómetros aproximadamente (en línea recta) en dirección suroeste desde la ciudad de Huaraz. Los laboreos mineros, los lugares de alojamiento, oficinas y otras infraestructuras, se encuentran entre los 3,800 y 4,300 metros sobre el nivel del mar 8 (Figura 1). Según las cartas geológicas nacionales el área está ubicada en el cuadrángulo de Huaraz (20H), zona UTM 18S.

2.3. Accesibilidad

Se accede desde la ciudad de Lima a través de la vía Panamericana Norte hasta llegar a la localidad de Pativilca (200 km) prosiguiendo por la vía asfaltada Pativilca - Huaraz (205 km). Después, se prosigue hacia la mina utilizando la carretera asfaltada Huaraz - Casma (14A) hasta llegar al sector llamado Punta Callán; desde allí, se toma un camino de trocha que conduce a las instalaciones mineras, sumando un trayecto total de 62 km desde la ciudad de Huaraz. (Figura 2) y desde Lima un total de 467 km hasta la UEA Admirada Atila (Tabla 2).

Tabla 1

Coordenadas de la zona de estudio

Vértice	Este (UTM WGS 84)	Norte (UTM WGS84)
1	205667.4673	8927449.744
2	206436.3528	8927449.744
3	206436.3528	8926813.21
4	205667.4673	8926813.21

Nota. Tabla elaborada por el autor.

[illegible]

Figura 2. Mapa de accesibilidad del área de trabajo. Muestra la ruta de accesibilidad desde Huaraz a la UEA Admirada Atila. Mapa redibujado por el autor con datos de INGEMMET.

Tabla 2

Ruta de accesibilidad a la zona de estudio

Ruta	Km	Tipo de Carretera	Horas
Lima - Pativilca	200	Asfaltada	3
Pativilca - Huaraz	205	Asfaltada	4
Huaraz - Punta Callán	33	Asfaltada	1
Punta Callán – UEA Admirada Atila	29	Trocha	1
TOTAL	467		9

Nota. Tabla elaborada por el autor.

2.4. Relieve y Drenaje

El área de estudio se encuentra a una elevación promedio de 4,000 m.s.n.m. El relieve en la zona es abrupto, pronunciado y con escarpas. (promontorios Huinac, Mata Mataballo punta, Huinapunta, Canchon, Macshay, Loncojirca, etc.) cuyas altitudes superan los 4,000 m.s.n.m.

Esta configuración geomorfológica constituye las laderas de la cordillera, en las cuales se encuentran diversas lagunas que representan la principal fuente de aprovisionamiento de recursos hídricos (laguna Condorcocha, Macshay, Huacras, Yanco, etc.) El drenaje es dendrítico, en la zona discurren las quebradas de Tinto, Huinac, Montecristo, Joncoruri, Carpa Pampa, Putupaqui, Macshay, etc. las cuales conforman parte de la cuenca hidrográfica del río Huarney.

2.5. Clima y Vegetación

El clima es de tipo lluvioso, frío; Las temperaturas máximas varían de 9°C a 19°C y temperaturas mínimas de -3°C a 3°C. Presenta un periodo de sequía de mayo a noviembre y lluvias de diciembre a abril. La flora corresponde a la región de Puna, siendo limitada debido a las bajas temperaturas, con las especies vegetales principales que incluyen: Puya Raimondi, el Ichu, pajonal, Huagoro, etc. (Senamhi, 2020).

2.6. Geología Económica

De acuerdo a INGEMMET (2021) el yacimiento minero Huinac se encuentra ubicado en la franja metalogénica XXI-A denominada “Epitermales de Au-Ag hospedados en rocas volcánicas”. Esta franja está compuesta principalmente por el metalotecto “Grupo Calipuy”, además, se tiene la presencia del “Grupo Goyllarisquizga” e intrusivos del Paleógeno-Neógeno. Se debe mencionar también que alrededor de el área de estudio se tiene la existencia de labores artesanales antiguas abandonadas, así como otras minas y proyectos mineros, tales como Proyecto Adriana de compañía minera Shuntur (a unos 15 Km.), Unidad Minera Huancapetí de compañía minera Lincuna (a unos 18 Km.), Proyecto Soledad de compañía Chakana Cooper (a unos 14 Km.), Proyecto Los Perdidos II de Nexa Resources (a unos 20 Km.), Proyecto La Merced de Barrick Misquichilca (a unos 6 Km) y otras minas pequeñas.

El yacimiento minero Huinac es un yacimiento polimetálico con leyes promedios de 15.27 Oz/Tc Ag; 3.48% Pb; 9.6% Zn y 0.73% Cu. Tiene reconocido nueve vetas, entre principales (Pierina, Don Raúl, Amapola, Montecristo) y tensionales (Esperanza, Falsa Esperanza, Caira, Papa Francisco y Madrugada) en diferentes niveles, las vetas se presentan de manera subparalela, distanciándose entre sí por tramos de 100 a 150 metros. aproximadamente, también son transversales en el caso de las tensionales; estas estructuras se caracterizan por tener zonas de adelgazamiento - ensanchamiento y empobrecimiento - enriquecimiento económico formando el típico estilo de mineralización rosario. Estas estructuras se caracterizan también por tener altas leyes de de Ag, Zn, Pb y valores significativos de Cu, habiéndose identificado minerales como calcita y rodocrosita, rodonita, galena, esfalerita, pirita y tetraedrita.

3. CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Bases Teóricas

3.1.1. Sistema pórfido magmático-hidrotermal.

Los magmas hidratados que se consolidan cerca de la superficie generan sistemas hidrotermales-magmáticos debido a la interacción de los fluidos acuosos residuales tardíos con las aguas meteóricas que se calientan cerca al cuerpo intrusivo, los fluidos acuosos que se separan de los magmas cristalizados generalmente se canalizan a través de sistemas de fracturas dentro del cuerpo intrusivo y/o dentro de las rocas de la pared circundante formando así los típicos yacimientos tipo pórfido, skarn, epitermales y cordilleranos, el agua en este proceso juega un rol muy importante (Pirajno, 1992).

Es importante mencionar el concepto de ebullición en magmas. La primera ebullición es la que ocurre en un magma durante la descompresión, provocando la exsolución de los volátiles debido a su disminución de solubilidad, esto es resultado de la reducción de la presión. La segunda ebullición o ebullición retrógrada tiene lugar como resultado de la mayor concentración de volátiles debido a los efectos de la cristalización. El aumento continuo de H₂O en la masa fundida residual durante la cristalización es tal que, en algún momento, la presión en H₂O se vuelve igual a la presión de confinamiento y se produce una ebullición retrógrada. Esta ebullición retrógrada tiene el efecto de crear una fase acuosa separada, es decir, una solución hidrotermal (Pirajno, 1992).

La fase hidrotermal que se produce durante la segunda etapa de ebullición será responsable de atrapar los metales del magma antes de que se integren a los minerales que componen la roca (Pirajno, 1992). La etapa hidrotermal se compone principalmente de una solución acuosa salina y una fase de vapor, suministrando metales a la solución acuosa salina principalmente en forma de

complejos clorurados (Candela, 1994) y a la fase vapor (Heinrich, et al., 1992). Hasta ahora, no hay información que señale la profundidad dentro del sistema magmático interconectado en la región donde tiene lugar la segunda fase de ebullición y separación masiva de la fase hidrotermal. Sin embargo, distintos modelos coinciden en que estas profundidades son del orden de 5 a 6 kilómetros (Pirajno, 1992). Una vez separada, la fase hidrotermal ascendería a través del mismo sistema magmático hasta alcanzar profundidades aproximadas de 2 a 2.5 kilómetros. Es importante señalar que en las fases iniciales de la intrusión subvolcánica, existe una marcada diferencia de temperatura entre la intrusión y la roca hospedante, haciendo que la roca hospedante se comporte inicialmente de manera frágil. A medida que esta roca anfitriona se ve afectada por intrusiones sucesivas, la temperatura aumenta, generando una anomalía isotérmica que desplaza las isotermas hacia la superficie. La zona de transición entre la roca frágil y la roca dúctil se identifica principalmente por el límite de la isoterma de 400 °C. (Fournier, 1999).

La acumulación y concentración de fluidos hidrotermales magmáticos tienen lugar debajo de la interfaz entre las zonas dúctil y frágil, lo que resulta en un aumento progresivo de la presión de vapor en el sistema. Cuando esta presión logra superar la presión confinante, se activan procesos de brechificación hidrotermal. Una vez que la presión de vapor disminuye, el sistema tiende a cerrarse, dando lugar a una nueva acumulación. Este proceso implica ciclos periódicos y repetitivos a lo largo del tiempo (Fournier, 1999). En la parte superior, que presenta características frágiles debido a la anomalía térmica vinculada al sistema intrusivo, se genera una circulación de aguas meteóricas en celdas convectivas. Estas aguas desempeñan un papel esencial en el enfriamiento rápido del sistema. El diaclasamiento y la naturaleza frágil facilitarán, guiarán y concentrarán el flujo de fluidos hidrotermales magmáticos (como vetillas de corte recto y vetas), incrementando significativamente la proporción de agua con respecto a la roca. Esto permite una

mezcla parcial con aguas meteóricas y un enfriamiento progresivamente más rápido. Además, el desarrollo de fiders o megabrechas hidrotermales, como diatremas en ambientes volcánicos, modifica las condiciones de permeabilidad en la zona de transición, actuando como canales que permiten el flujo de los fluidos hidrotermales y facilitan su ascenso a niveles más superficiales para el desarrollo de alteración y mineralización, produciendo así otros tipos de depósitos de menor temperatura como epitermales y cordilleranos (Figura 3 y 8).

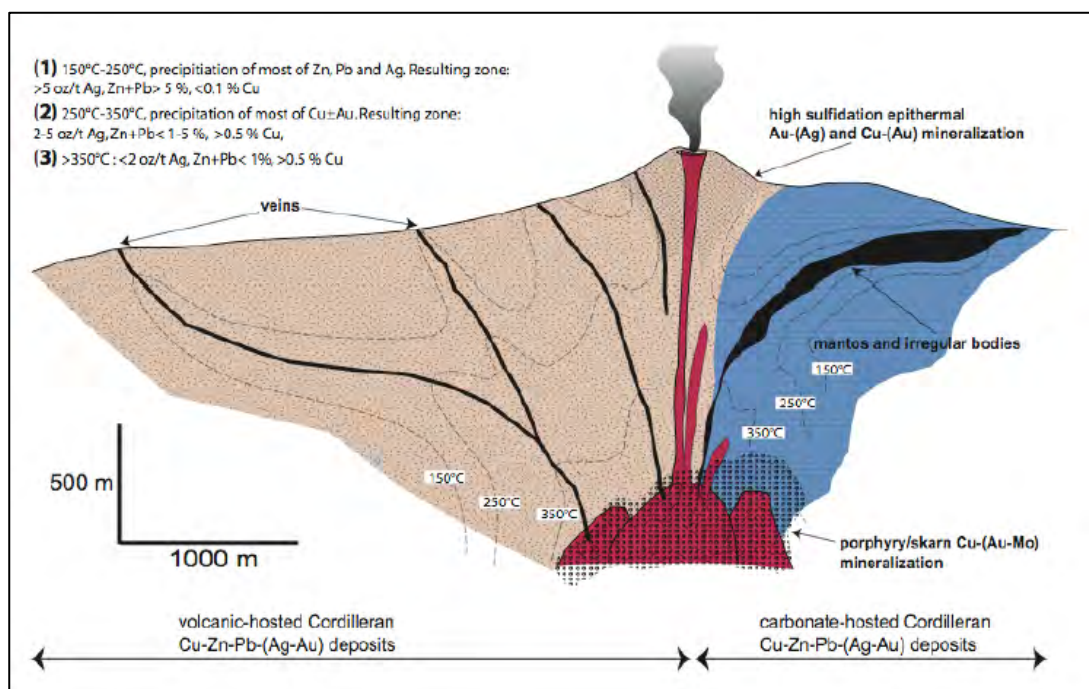


Figura 3. Posición esquemática de los depósitos cordilleranos y otros tipos de yacimientos en un sistema pórfido. Tomado de “Cordilleran or Butte-type Veins and Replacement Bodies as a Deposit Class in Porphyry Systems” por L. Fontboté y R. Bendezú, 2009.

3.1.2. Depósitos Cordilleranos o tipo “Butte”.

Este tipo de mineralización está relacionada a un sistema pórfido, es conocida en diferentes partes del mundo, siendo la mayoría del tipo epitermal, se ubica en las partes superiores de dichos sistemas, corta vetas y zonas de alteración potásica y fílica anteriores a su formación, y se presenta a manera de vetas, cuerpos masivos o mantos de reemplazamiento y también como cuerpos de brecha que contienen minerales de sulfuros (Fontboté & Bendezú, 2009).

Depósitos de este tipo se tiene en San Cristóbal, Andaychagua, Carhuacayán, Quiruvilca, Huarón, Yauricocha, Morococha, Hualgayoc, Colquijirca y Cerro de Pasco en Perú; Butte, Magma, Superior, Bisbee y Tintic en USA; Bor en Serbia; Erstberg en Indonesia.

3.1.2.1. Características principales.

Según Fontboté y Bendezú (2009) los rasgos distintivos de este tipo de yacimiento son los siguientes:

- Asociación espacio-temporal con actividad ígnea calcoalcalina que han formado otros depósitos, en otras palabras, el entorno geológico similar que comparte con la mayoría de los depósitos tipo pórfidos de cobre y depósitos epitermales de alta sulfuración de oro y plata. Muchos depósitos de este tipo como Butte o Morococha están sobreimpuestas a depósitos tipo pórfidos.
- Tienen una deposición tardía en la evolución del sistema pórfido, la relación con otros depósitos y los datos geocronológicos indican que los pórfidos de cobre, skarn, y depósitos de alta sulfuración (Au-Ag) son anteriores a la formación de estos depósitos. Con frecuencia, la mineralización polimetálica ocurre después de una fase temprana de alteración cuarzo-sericita que podría incluir volúmenes significativos de pirita.
- La mineralización se da en condiciones epitermales a poca profundidad es decir en niveles someros.
- A menudo se presenta una zonación muy marcada en los minerales de mena y en minerales de alteración.
- La mineralización principalmente se presenta como vetas y cuerpos de brechas en rocas silicatadas, también como en cuerpos de reemplazamiento en rocas carbonatadas.
- Estos tipos de yacimientos presentan ratios de Ag/Au considerablemente más altos que los yacimientos epitermales de alta sulfuración de Au-Ag.

- Los fluidos mineralizantes son líquidos acuosos con salinidad moderada a baja y una temperatura inferior a los 375°C.

3.1.2.2. Zonación mineralógica.

La zonación mineralógica es un rasgo que se presenta muy a menudo en la mayoría de depósitos de este tipo, pero no es un rasgo indispensable en estos depósitos (Figura 4 y 5); según Fontboté y Bendejú (2009) se distinguen dos estilos de zonación; se puede presentar sectores con una zonación muy desarrollada y otros que son pobremente zoneados; el primero se caracteriza por tener núcleos donde predomina la enargita, pirita, $\pm$ cuarzo (tennantita, wolframita, calcopirita, covelita, calcosita, alunita, dickita, caolinita) y las partes externas dominadas por esfalerita pobre en Fe, galena $\pm$ (sericita, caolinita, dickita, hematita, siderita); mientras que los pobremente zoneados se caracterizan por tener partes internas consistente en pirrotita, pirita, cuarzo ($\pm$ calcopirita, arsenopirita y partes externas de esfalerita rica en hierro, galena, $\pm$ pirrotita (rodocrosita, siderita, y otros carbonatos, sericita, clorita, cuarzo).

Según Fontboté y Bendejú (2009) el mismo depósito puede albergar ambos estilos de zonación esto sugiere que los fluidos responsables de la mineralización experimentaron variaciones significativas en términos de pH y sulfuración, transitando desde estados altamente ácidos y altamente sulfurados hasta estados moderadamente ácidos y con bajos niveles de sulfuración. Este fenómeno indica que el grado de sulfuración en depósitos de esta naturaleza está fuertemente influenciado por diversos factores, que incluyen la temperatura, la ruta seguida por los fluidos mineralizantes y su interacción con la roca circundante. En consecuencia, el mismo tipo de fluidos originados por un sistema magmático-hidrotermal similar puede o no generar una zonación metálica.

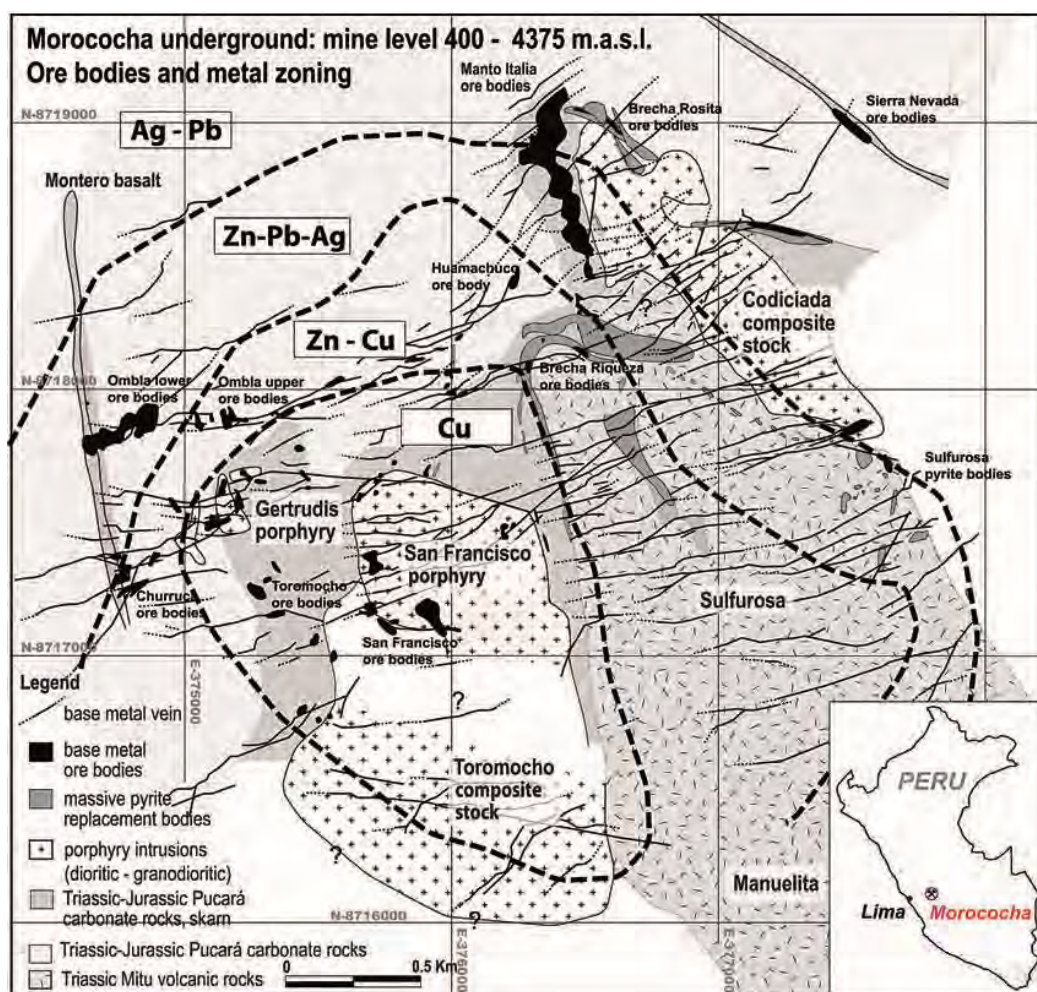


Figura 4. Zoneamiento metálico en las vetas polimetálicas de Morococha, donde se tiene un sector central rico en cobre (Cu), un sector intermedio de zinc-cobre (Zn-Cu) y áreas exteriores de zinc-plomo-plata (Zn-Pb-Ag) y plomo-plata (Ag-Pb). Tomado de “Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned cordilleran base metal district, Morococha, central Peru” por H. Catchpole et al., 2012.

3.1.2.3. Zonación en la alteración de la roca caja.

De acuerdo con Fontboté y BendeZú (2009) la alteración puede tener una zonación similar a la zonación mineralógica, pero esto está principalmente determinado por la proporción de vapores que se desgasifican simultáneamente con los fluidos acuosos de baja salinidad, los cuales se consideran responsables de la mineralización polimetálica. Si la proporción de fluidos ácidos y vapores oxidados es elevada, es probable que se desarrolle una alteración argílica avanzada, lo que podría resultar en un patrón de zonificación. Sin embargo, si la salinidad es baja, los fluidos

acuosos menos ácidos predominan, en otras palabras, en el caso de los fluidos que se considera que generan la mineralización en este tipo de depósitos, aquellos que no promueven alteración ácida no experimentan ningún desarrollo de este tipo de alteración. Esta observación podría explicar por qué varios depósitos que comparten similitudes con los depósitos cordilleranos, como su naturaleza tardía en la vida de un sistema magmático-hidrotermal, muestran una zonación débil como en San Cristóbal en el centro de Perú y una gran parte de las vetas de Morococha,

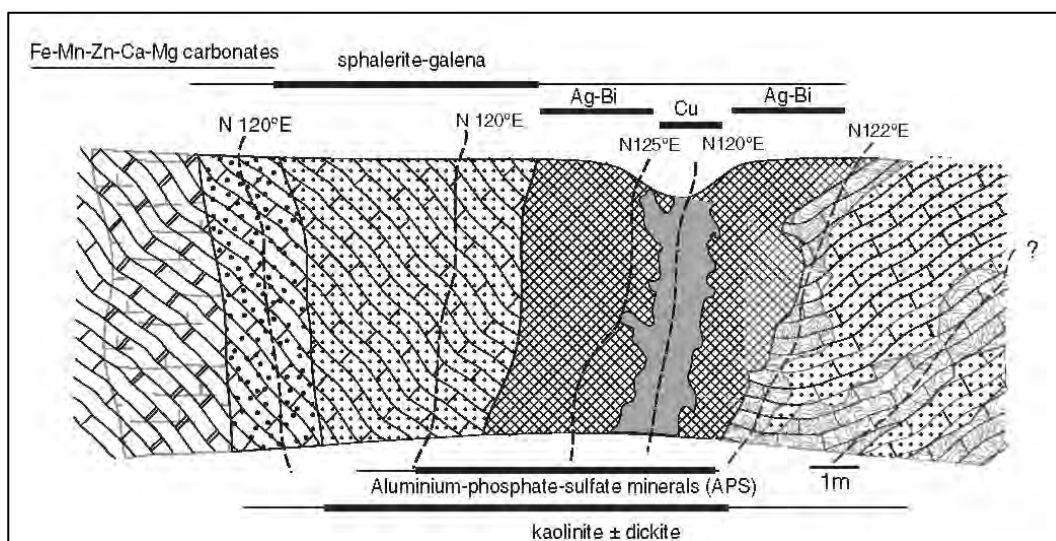


Figura 5. Zonación idealizada en el yacimiento de Cerro de Pasco, se tiene una zona central rica en cobre (Cu), una zona intermedia de zinc-cobre (Ag-Bi) y zonas exteriores de zinc-plomo-plata (Zn-Pb) y carbonatos. Tomado de “Mineral Zoning and Geochemistry of Epithermal Polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi Mineralization at Cerro de Pasco, Peru” por R. Baumgartner et al., 2008.

3.1.2.4. Paragénesis mineral

De acuerdo a (Catchpole et al., 2011). Las vetas muestran una clara zonificación interna y pueden ser divididas en tres etapas según las relaciones de corte. En la primera etapa se destaca la presencia de cuarzo y pirita sin valor económico, acompañados de halos de alteración sericitica. La segunda fase está compuesta de metales base, principalmente sulfuros de Zn-Pb-Ag-Cu, y la última etapa que es de carbonatos se caracteriza por la abundancia de rodocrosita y cuarzo. La etapa de metales base se puede subdividir en varios subestadios. Las etapas y subestadios pueden

ser discretos dentro de una sola veta, o, por el contrario, presentarse como vetas individuales con claras relaciones de corte, por ejemplo, donde las vetas cortan cuerpos masivos de piritita. Los sulfuros más abundantes son galena, esfalerita, tenantita-tetraedrita, calcopirita y enargita. La plata está mayormente presente como un elemento traza o menor en tenantita-tetraedrita y como telururo de Ag (hessita), mientras que la galena es en su mayoría es pobre en Ag (Catchpole et al., 2015). Se presenta una paragénesis mineral generalizada en la Figura 6.

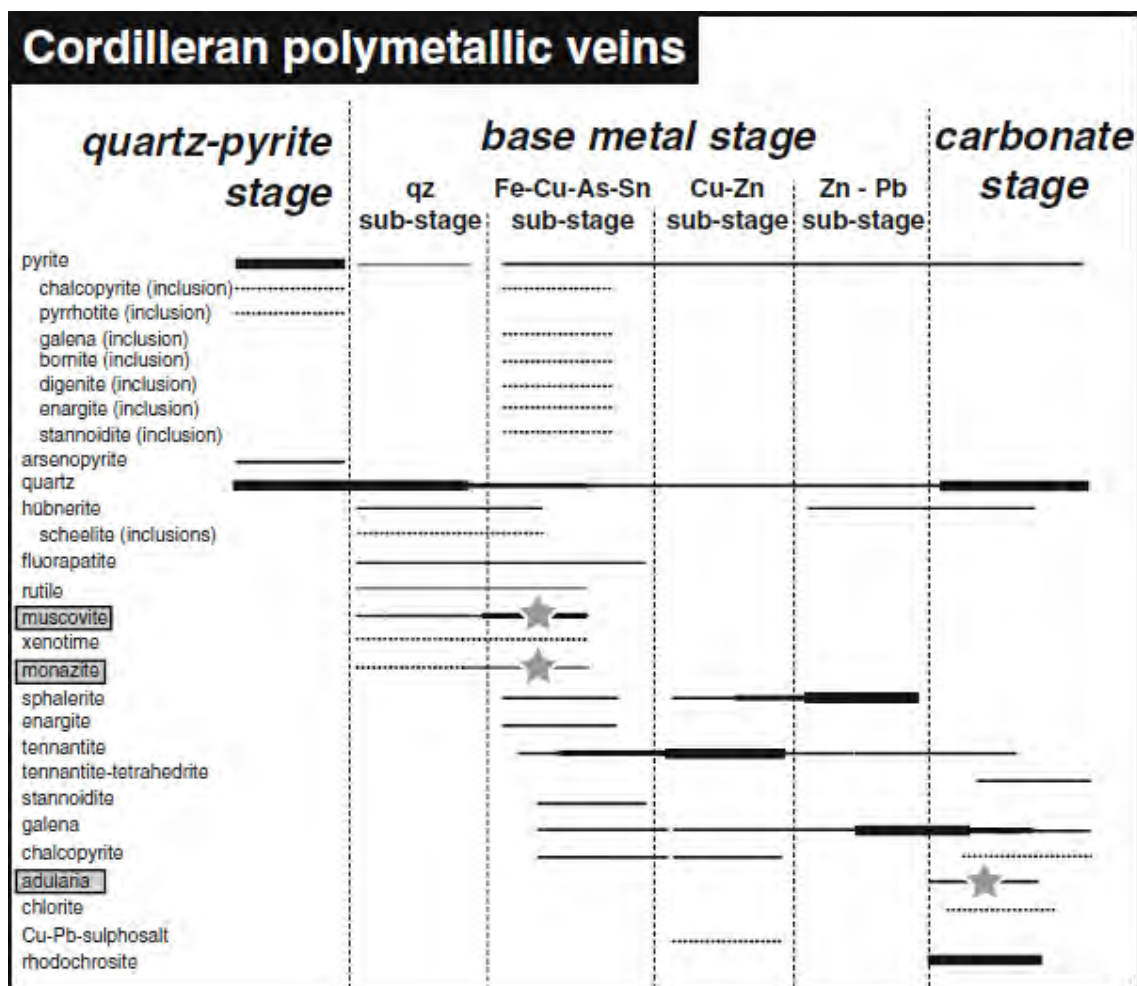


Figura 6. Paragénesis mineral generalizada de las vetas polimetálicas cordilleranas. Tomado de “Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru” por H. Catchpole et al., 2015.

3.1.2.5. Estadios de mineralización.

En los depósitos cordilleranos se tiene principalmente la presencia de 3 estadios, denominados A, B y C (Figura 7), estos estadios se definen haciendo analogías entre distintos yacimientos como en Cerro de Pasco (Rottier et al, 2018), La Tapada (Bernaola et al, 2019), Ayawilca (Uzieda et al, 2020), Proyecto Zoraida (Supa, 2021), entre otros. En algunos casos se presenta un estadio “pre-A”, en otros “Post-C”. Estos estadios no siempre están presentes, en algunos casos están superpuestos y en otros casos solo aparece uno de ellos (Rottier et al, 2018). A continuación, se detalla los estadios.

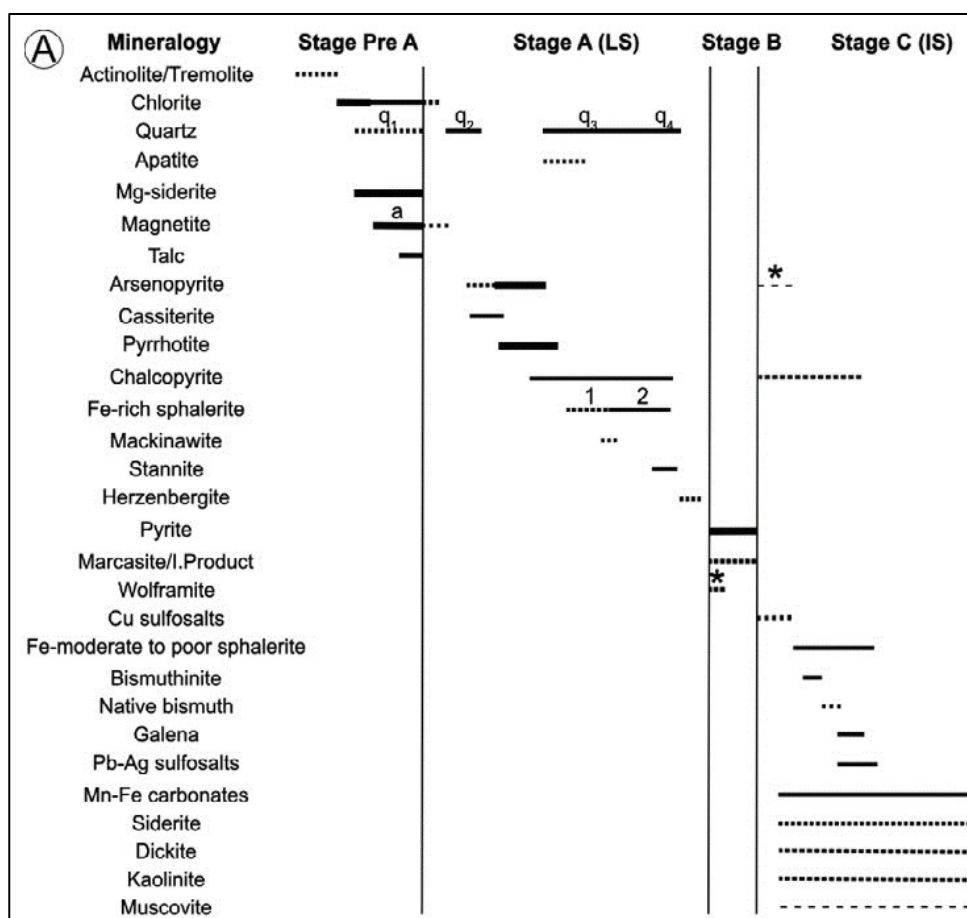


Figura 7. Estadios de mineralización típicos en depósitos cordilleranos, se tiene estadios A, B y C. Tomado de “Mineralization stages at the Ayawilca Zn-Pb-In-Ag-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru: new insights.” por M. Uzieda et al., 2020.

Estadio A

Se distingue por sus características de baja sulfuración (Figura 8), los minerales típicos de este estadio son la magnetita, pirrotita y esfalerita rica en hierro (marmatita); puede haber otros minerales como arsenopirita (típico de baja sulfuración), calcopirita, casiterita, estannita, herzenbergita (Uzieda et al, 2020), galena, pero en muy escasas cantidades (Supa, 2021). La ganga principalmente es cuarzo y clorita, la temperatura llega hasta 370°, baja hasta 220° (Fontboté, 2023). En muchos casos este estadio está ausente, muy poco desarrollado o reemplazado por los siguientes estadios (Fontboté, 2023), generalmente se encuentra reemplazado o en proceso de reemplazamiento por minerales del segundo estadio (Supa, 2021).

Estadio B

Al tener condiciones más ácidas que el estadio anterior, las características que se presentan en este estadio son de intermedia sulfuración, se produce la alteración es cuarzo-sericita $\pm$ arcillas (Bernaola et al, 2019). Se distingue por presentar marcasita y pirita (Uzieda et al, 2020) de forma masiva, anhedrales a subhedrales producto de la alteración de la pirrotita y la arsenopirita del estadio anterior, con cuarzo asociado (Supa, 2021); además puede haber hematita, wolframita y oro (Fontboté, 2023), este estadio generalmente está reemplazando al estadio A.

Estadio C

Este estadio puede tener características de alta sulfuración o intermedia sulfuración (Fontboté, 2023). Si las condiciones de pH fueron más ácidas, entonces las características son de alta sulfuración, donde se presenta el ensamble de enargita, famatinita, covelita, esfalerita (pobre en hierro), cuarzo, alunita y caolinita (Fontboté, 2023). Por otro lado, si las condiciones fueron oxidantes y pH ácido se tiene características de sulfuración intermedia (Bernaola et al., 2019), el ensamble característico es esfalerita (pobre en hierro), galena, tennantita-tetraedrita y otros

sulfosales, bismutinita, calcopirita, alabandita, rodocrosita (muy típico) y otros carbonatos, caolinita, illita (Supa, 2021). A diferencia de los estadios anteriores en muchas ocasiones este estadio suele ser el más importante debido a que es el que contiene las mayores cantidades de plata (Fontboté, 2023).

En algunos yacimientos se han diferenciado estadios denominados Pre-A o Post-C, los cuales tendrán características propias en cada yacimiento, la etapa Pre-A consiste principalmente en un skarn progrado, el cual consiste en siderita, magnetita, cuarzo prismático, talco y clorita, actinolita-tremolita, este caso se da en Ayawilca por ejemplo (Uzieda et al., 2020) (Figura 8). La etapa Post-C está representadas por una serie de pequeñas vetas y vetillas de calcita que contienen cantidades mínimas de esfalerita, galena, calcopirita y trazas de arsenopirita, las cuales cortan los estadios anteriores, este caso se presenta en La Tapada - Carhuacayán (Bernaola et al., 2019).

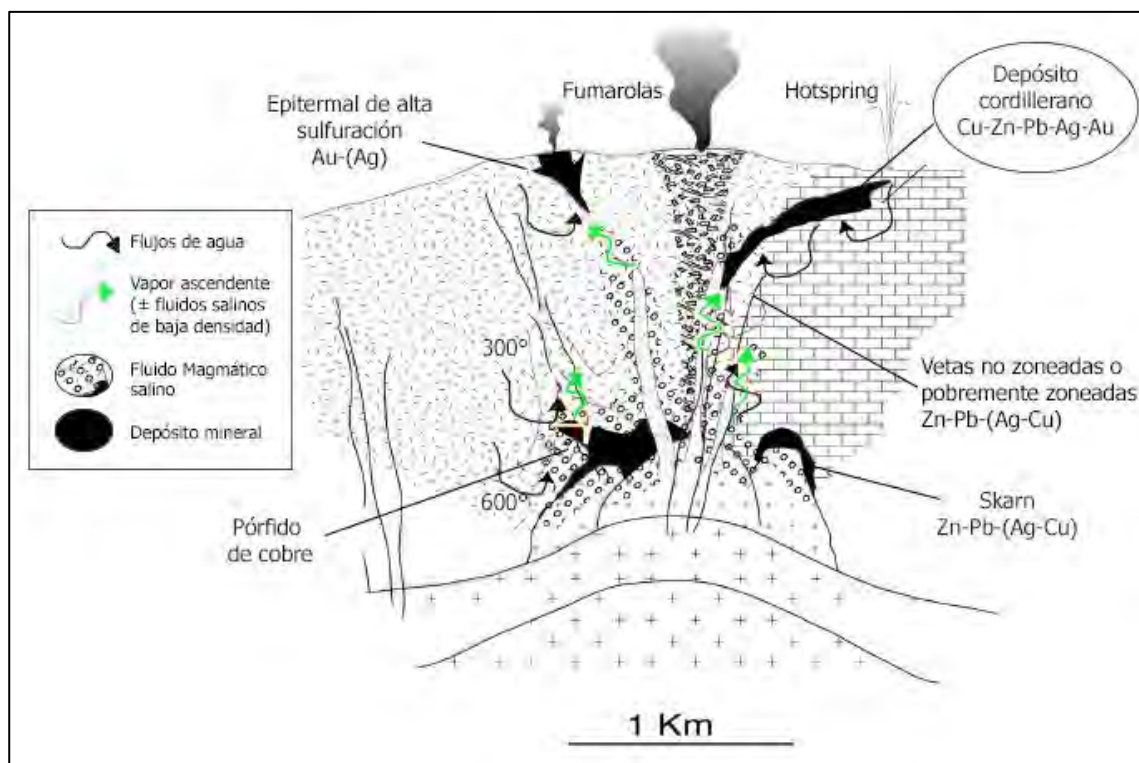


Figura 8. Evolución del sistema pórfido donde se forman distintos tipos de yacimientos como pórfidos, skarns, epitermales y cordilleranos. Tomado y editado de “Zinc, Lead, Silver in Porphyry Systems from By-products to World Class Deposits” por L. Fontboté, 2012.

3.1.3. Evolución del estado de sulfuración

Basado en Einaudi et al. (2003) el término "estado de sulfuración" no se corresponde de manera precisa con los conceptos de "alta sulfuración" (HS) y "baja sulfuración" (LS) que se emplean en la clasificación de depósitos epitermales (White y Hedenquist, 1990; Hedenquist et al., 1994). A pesar de esto, los ensambles de minerales de sulfuros que caracterizan la mayor parte de los yacimientos epitermales, como la enargita en depósitos de alta sulfuración, generalmente se ajustan o encajan en la clasificación de estos estados de sulfuración (Einaudi et al., 2003), de menor a mayor, estos estados son: "muy bajo", "bajo", "intermedio", "alto" y "muy alto" (Figura 9).

3.1.3.1. Estado de sulfuración en vetas polimetálicas relacionadas con pórfidos de cobre

Acompañando a ciertos plutones de pórfido de cobre de tipo calcoalcalinos, se encuentran depósitos polimetálicos en los cuales los minerales de cobre en un estado de sulfuración muy alto o alto se presentan en vetas, reemplazos masivos y brechas cementados con sulfuros (Einaudi et al., 2003). Por lo general, se observa un patrón de zonificación, que abarca desde los minerales de cobre en la región central que contienen enargita y están asociados con una alteración argílica avanzada y/o sericitica, hasta los minerales de tennantita (Cu)-Pb-Zn en las áreas periféricas que están relacionados con una alteración argílica intermedia (Bartos, 1989; Petersen, 1965; Einaudi, 1982; Hemley & Hunt, 1992).

Según Einaudi et al. (2003) Una característica común de las vetas relacionadas con pórfidos es una etapa temprana de sulfuración y silicificación de las rocas encajonantes, acompañada de abundante pirita como relleno de la veta. Esta etapa temprana de pirita-cuarzo es seguida por la deposición de sulfuros de Cu-Fe-As en las vetas (por ejemplo, en Butte y muchos otros lugares) o en brechas intrusivas con matriz de pirita, como en Bisbee, Arizona, con o sin pirita adicional. Butte en Montana, sigue siendo el referente con el que se comparan todas las vetas relacionadas

con pórfidos, en parte porque este depósito es el gigante de su clase, pero más importante aún debido a las detalladas descripciones de las rocas y minerales y las perspicaces interpretaciones realizadas por Reno Sales y Chuck Meyer. El conjunto pirita + digenita + covelita está presente solo en una zona restringida de la región central que generalmente está caracterizada por presentar pirita, calcosita y enargita, siendo la calcosita el mineral de cobre más abundante, la zona central está rodeada por una zona de transición que contiene pirita, bornita, calcopirita y tennantita con esfalerita residual, y una zona periférica que contiene sulfuros de Zn, Pb y Ag y carbonato de Mn (Einaudi et al., 2003).

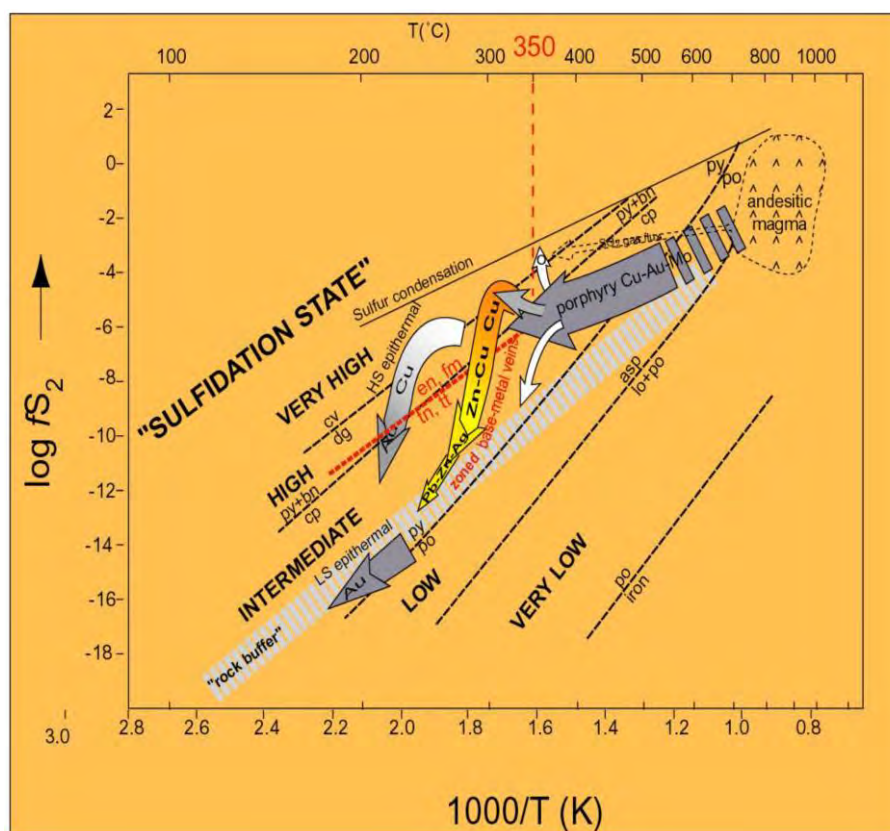


Figura 9. Diagrama $\log fS_2$ - $1000/T$ que define el estado relativo de sulfuración de los fluidos hidrotermales y la trayectoria evolutiva de los fluidos en los yacimientos de cobre porfírico, vetas polimetálicas relacionadas con pórfidos y depósitos epitermales de oro-plata en términos de una serie de posibles trayectorias de enfriamiento. Tomado de "Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments" por M. Einaudi et al., 2003.

La existencia de pirrotita es un indicador característico de condiciones de sulfuración baja entre 192°C y 250°C, asimismo, la baja sulfuración se confirma a través del significativo contenido de FeS en la esfalerita en equilibrio con la pirita en los minerales de Zn-Pb (Baumgartner et al., 2008).

El entorno de deposición de la primera etapa de mineralización en el yacimiento de Cerro de Pasco por ejemplo se muestra en la figura 11. La trayectoria evolutiva de la primera etapa se representa mediante una flecha negra etiquetada como "Ipy-qtz" para los cuerpos de pirita-cuarzo y "Ipo-sl" para los cuerpos de pirrotita y los minerales de Zn-Pb (Baumgartner et al., 2008).

Según Baumgartner et al. (2008). en la segunda fase de mineralización las reacciones y ensamblajes minerales de las zonas centrales de las vetas de enargita-pirita y los cuerpos de mena de reemplazo en rocas carbonatadas, y en particular la presencia de enargita y famatinita, indican estados de alta sulfuración. Esto se confirma por los bajos contenidos de FeS en la esfalerita de los cuerpos de mena de reemplazo en rocas carbonatadas, Además, los ensamblajes de alteración con el desarrollo de cuarzo vuggy residual en el diatrema y la deposición de alunita tanto en las vetas de enargita-pirita como en los cuerpos de mena de reemplazo en rocas carbonatadas indican la presencia de fluidos muy ácidos y oxidantes (pH por debajo de 2), lo cual concuerda con una condición de alta sulfuración. (Einaudi et al., 2003). En las zonas externas de los cuerpos de mena de reemplazo en rocas carbonatadas, el estado de sulfuración es intermedio (indicado por la reacción mineral hematita + pirita $\Rightarrow$ magnetita a 168° a 222°C), probablemente debido a la interacción del fluido con la roca anfitriona de carbonato, y señala una disminución en los estados de sulfuración en comparación con las zonas centrales. Esto se respalda en el hecho de que la esfalerita de la segunda etapa en la zona más externa presenta ligeramente mayores contenidos de FeS. La evolución de la segunda etapa de mineralización se muestra en un diagrama log fS₂-T (Fig. 10), simbolizado por dos flechas grises. La flecha Ilen-py corresponde a la trayectoria de las

asociaciones mineralógicas basado en Corbett y Leach (1998), Reed (1997), Rose y Burt (1979) y Meyer y Hemley (1967) se tiene las siguientes:

3.1.4.1. Alteración propilítica

Principalmente identificada por la presencia conjunta de clorita y epidota, ya sea con o sin albita, calcita y piritita, junto con minerales accesorios como cuarzo, magnetita e illita. Por lo general, esta alteración se manifiesta como un halo gradacional y distante respecto a una alteración potásica, gradando desde actinolita-biotita en el contacto con la zona potásica hasta actinolita-epidota en la zona propilítica. (Barton & Skinner, 1979). En áreas más alejadas, se pueden observar asociaciones de epidota, clorita, albita y carbonatos, que gradan hacia zonas progresivamente más ricas en clorita y zeolitas hidratadas, formadas en condiciones de baja temperatura. esta zonificación y gradación características reflejan un descenso en la gradiente térmica desde el núcleo (alteración potásica) hacia el exterior. Esta alteración se desarrolla en condiciones de pH neutro a alcalino y a temperaturas más bajas (entre 200 y 250°C). La actinolita podría indicar la presencia de la zona interior de alteración propilítica (Towley, 2011).

3.1.4.2. Alteración argílica

El rasgo distintivo de esta alteración es la existencia de minerales arcillosos, como el caolín, con diversas proporciones de cuarzo, esta alteración experimenta una transición progresiva, manifestándose con características de alteración filica en las partes más internas y adoptando características de alteración propilítica en las áreas externas (Rose y Burt, 1979). Este tipo de alteración es frecuente en sistemas de tipo pórfido. En entornos epitermales, se distinguen por experimentar una lixiviación ácida intensa y, por lo tanto, la alteración argílica se presenta como un indicador valioso para la mineralización. Los minerales arcillosos reemplazan principalmente a las plagioclasas y a los silicatos máficos, como hornblenda y biotita. (Pirajno, 1992).

- Argílica intermedia. Está definida por la presencia de montmorillonita, illita, clorita, arcillas del grupo caolín (caolinita, dickita, halloysita, hallofano) y menor sericita, mientras que el feldespato potásico puede permanecer inalterado y el K, Ca, Mg, Na no completamente lixiviados; puede estar presente una zonificación dentro de la alteración argílica intermedia, la caolinita se ubica más próxima a la región fílica, mientras que las arcillas de montmorillonita se sitúan en las áreas externas. (Pirajno, 1992).

- Argílica avanzada. Según Pirajno (1992) se debe a un intenso ataque ácido y a una lixiviación más o menos completa de los cationes alcalinos con destrucción completa de los feldespatos y las fases de silicato máfico. Dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita y diáspora son las fases minerales típicas de este tipo de alteración; además, pueden estar presentes sulfuros, topacio, turmalina y una variedad de arcillas amorfas; los minerales de sulfuro pueden incluir covelita, digenita y enargita (altas proporciones de azufre a metal). La alteración argílica avanzada se encuentra en sistemas de pórfido, en las zonas internas de bases hidrotermales y vetas que contienen metales preciosos, y más típicamente en los sistemas epitermales con alto contenido de azufre. La alteración alunitica es parte de la alteración argílica avanzada y, en presencia de abundantes iones sulfato, puede convertirse en una fase dominante, como se mencionó anteriormente. Los minerales del grupo de la alunita incluyen alunita, natroalunita (Na reemplaza a K) y jarosita (Fe reemplaza a Al), los minerales que lo acompañan son caolinita, sericita, jarosita, pirita, barita, hematita, calcedonia y ópalo (Pirajno, 1992).

3.1.4.3. Alteración fílica o sericítica

Se identifica por la presencia del conjunto cuarzo-sericita-pirita (QSP). Las fases minerales típicamente vinculadas con la alteración QSP incluyen feldespato potásico, caolinita, calcita, biotita, rutilo, anhidrita y apatita. Esta alteración evoluciona hacia un tipo potásico al incrementarse

las cantidades de feldespato potásico y/o biotita, y hacia un tipo argílico al aumentar la proporción de minerales arcillosos (Barton y Skinner, 1979). Según Pirajno (1992) La alteración QSP es una de las habituales, ya que se observa en prácticamente todos los yacimientos hidrotermales.

3.1.4.4. Silicificación

Esta es posiblemente una de las alteraciones hidrotermales más corrientes y bien reconocidas; las variaciones más usuales de sílice incluyen el cuarzo de baja temperatura o cuarzo bajo, y el cuarzo de alta temperatura. o cuarzo alto ($> 573\text{ }^{\circ}\text{C}$), tripdimita, cristobalita, ópalo y calcedonia. Durante los procesos hidrotermales, se puede introducir sílice desde los fluidos en circulación o puede permanecer como sílice residual tras el proceso de lixiviación. La solubilidad de la sílice aumenta con la temperatura y la presión, y si la solución experimenta una expansión adiabática, la sílice se precipita. Por lo tanto, en áreas de baja presión y temperatura se deposita fácilmente. Muchos depósitos minerales epitermales, se caracterizan por sinterizaciones, coberturas de sílice, brechas silíceas, vetas y silicificación de rocas encajonantes (Pirajno ,1992).

3.1.4.5. Carbonatación

De acuerdo con Towley (2011) Se caracteriza por la presencia de calcita, dolomita, ankerita, siderita, con mayor o menor cantidad de sericita, piritita y/o albita. La presencia de carbonatos ocurre en un amplio rango de temperaturas y pH, asociados con caolinita, clorita y minerales calco-silicatados. En muchos sistemas hidrotermales, se observa una zonación de carbonatos en función de un incremento en el pH; los carbonatos de Fe-Mn (siderita-rodocrosita) coexisten con caolinita e illita, mientras que los carbonatos mixtos de Ca-Mn-Mg-Fe (rodocrosita-ankerita-kutnahorita-dolomita) aparecen con illita y clorita, y los carbonatos de Ca-Mg (dolomita-calcita) se encuentran con clorita y minerales calco-silicatados, esto es resultado de una disminución en la movilidad de Fe, Mn y Mg a medida que el pH aumenta progresivamente.

3.2. Ejemplos de otros yacimientos similares

3.2.1. La Tapada - Carhuacayán

El yacimiento polimetálico cordillerano de Carhuacayán, se encuentra a unos 4 kilómetros al noroeste de la localidad de Santa Bárbara de Carhuacayán, ubicada en la región de Junín. Desde el año 2016, la empresa Volcan Compañía Minera S.A.A. se encuentra evaluando la región que abarca, entre otros prospectos, Toldojirca, La Tapada y Candelaria.

Según Bernaola et al. (2019) en el proyecto, se pueden observar rocas carbonatadas de la formación Jumasha, hacia la parte superior, hay sedimentos continentales de la formación Casapalca, se ha detectado una capa de transición ubicada debajo de la Formación Jumasha, compuesta por sedimentos silicoclásticos. Se tiene la presencia de un Pórfido dacítico, brecha intrusiva y Pórfido cuarzo feldespático. Se ha reconocido alteración filica y potásica generalmente. Una de las características geológicas destacadas en la zona es el anticlinal Carhuacayán, que se extiende en dirección noroeste a sureste. Las fracturas, fallas y características lineales más significativas en la superficie siguen principalmente las direcciones noroeste- sureste, oeste-este y noreste-sur. Las vetas se encuentran en concordancia con las estructuras que se orientan en la dirección noreste-sur, y en menor medida, con las estructuras que van de oeste a este.

Bernaola et al. (2019) identificó tres estadios de mineralización que son análogos a los estadios del yacimiento de Cerro de Pasco, el primero denominado estadio “A” se presenta en mantos de reemplazamiento y en algunos casos en sedimentos silicoclásticos. En términos generales, la magnetita es el mineral más abundante, seguido de cerca por la pirrotita que está intercrecida con esfalerita rica en hierro., esta exhibe un tono marrón oscuro, que se aclara en las áreas más alejadas; este estadio es rico en zinc, sin embargo, La ausencia de Pb, Ag y Cu no es evidente en las observaciones. La mineralogía indica condiciones de pH bajo (baja sulfuración).

El segundo estadio es denominado “B”, caracterizado por reemplazamientos de pirita (idiomórfica y masiva), se manifiesta en mantos subparalelos y también en estructuras subverticales. Las evidencias demuestran que es posterior al estadio “A”, contiene oro, pero aun así carece de importancia económica (Bernaola et al., 2019).

El último estadio denominado “C” está conformado por vetillas, vetas y brechas subverticales, estas atraviesan las fases anteriores y se ubican generalmente en formaciones de rocas carbonatadas, Hornfels, cuarcitas y brechas intrusivas. Estas estructuras varían de 5 cm a 1 m, contiene carbonatos, pirita, galena, cobres grises, esfalerita pobre en hierro y contenidos de plata; las texturas presentes son crustiformes y tipo peine; este estadio tiene la mayor importancia económica con leyes de 4.2% de Zn, 3.0% de Pb, 3.3 oz/tn Ag y cobre en algunos casos, ocurre la presencia de caolinita e illita y otros minerales que reflejan un estado de sulfuración intermedia (Bernaola et al., 2019). Se manifiesta un estadio post-C representado por vetillas y vetas que cortan a los demás estadios descritos anteriormente (Bernaola et al., 2019).

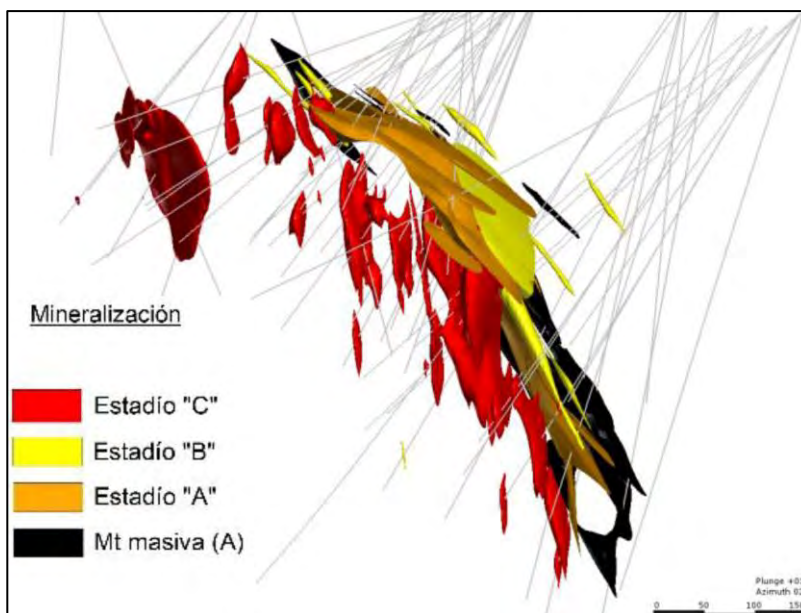


Figura 11. Modelo 3D de estadios de mineralización en el yacimiento La Tapada - Carhuacayán. Tomado de “Estadios de mineralización en La Tapada, yacimiento cordillerano polimetálico, Carhuacayán, Perú Central: su aplicación para modelar recursos y definir nuevos targets de exploración” por R. Bernaola et al., 2019.

3.2.2. Proyecto Zoraida - Andaychagua

El proyecto Zoraida se encuentra en el distrito de Suitucancha, provincia de Yauli, en el departamento de Junín, en el centro de Perú., este proyecto está siendo evaluado por Volcan Cía. Minera S.A.A. Según Carhuapoma (2020) la formación geológica más antigua identificada es el grupo Excelsior del Paleozoico inferior, que en la región sirve como el sustrato basal y está compuesto principalmente por filitas. Sobre este grupo, se encuentran unidades volcánicas y sedimentarias continentales del grupo Mitu, que tienen una edad que va desde el Pérmico hasta el Triásico, estas rocas están en discordancia con respecto a las rocas carbonatadas marinas del Triásico superior y el Jurásico inferior del grupo Pucará. Las formaciones del Jurásico y Cretácico muestran signos evidentes de deformación debida a la acción de fuerzas compresivas, esto se manifiesta en la formación de pliegues largos y estrechos, fallas inversas y extensiones significativas, a veces con desplazamientos de distancias considerables, en respuesta a la intensa compresión a la que han estado sometidas (Salazar, 1983). El Yacimiento está constituido por dos tipos de estructuras mineralizadas como son mantos y veta como relleno de fracturas (Supa, 2021).

Según Supa (2021) se presenta tres estadios de mineralización (Figura 12); el primer estadio o estadio “A” se caracteriza por tener minerales como pirrotita, arsenopirita y esfalerita con contenido alto en hierro. y en menor medida, calcopirita. La pirrotina generalmente se encuentra reemplazada o en proceso de sustitución por minerales de la segunda etapa, se ha notado la presencia puntual de galena que se intercala con la esfalerita rica en hierro. La mineralización en esta fase se presenta de manera remanente, aparece en forma de áreas discontinuas o fragmentos dentro de una matriz de mineralización posterior, que principalmente consiste en cuarzo y pirita. Los minerales de alteración relacionados incluyen epidota en mayor cantidad que clorita en las zonas más alejadas, mientras que, en las áreas distales, se observa más clorita que epidota.

En cuanto al estadio “B”, Supa (2021) lo divide en dos subfases. La primera se caracteriza principalmente por la presencia de pirita en una textura masiva a semimasiva, con un color amarillo latón, de grano fino a medio, en cristales subhedrales a anhedrales, y con cierta cantidad de cuarzo asociado. La cantidad de cuarzo en esta etapa varía, pero generalmente se encuentra mucha más pirita que cuarzo ($Py \gg Qz$). La segunda subfase está compuesta por pirita II, que se asemeja a la marcasita y tiene un tono más oscuro y aspecto terroso. La mineralización en esta etapa sustituye a la pirrotita y arsenopirita que estaban presentes en la primera fase. Los minerales de alteración que se asocian a esta fase son la moscovita y la illita.

En la última fase o estadio C, de acuerdo a Supa (2021) se aprecia carbonatos de calcio, hierro, magnesio, además de los carbonatos, se encuentran sulfuros como la galena, la calcopirita, la tennantita y la tetraedrita, conocidos como "cobres grises", así como sulfosales de plata, bournonita y boulangerita, que son sulfosales de plomo. La mineralización en esta etapa se presenta como relleno de fracturas, en los mantos, se puede ver que rellena los bordes de las estructuras y ocupa los espacios vacíos. Los minerales de alteración identificados son la dickita y la caolinita.

SECUENCIA PARAGENÉTICA - PROYECTO ZORAIDA					
MINERALES	FORMULA	ESTADIO A	ESTADIO B	ESTADIO C	SUPÉRGENO
PIRROTITA	$Fe_{0.9}S$				
ESFALERITA (Fe)	$(FeZn)S$ (~17 %Fe)				
ARSENOPIRITA	$FeAsS$				
CALCOPIRITA I	$CuFeS_2$				
PIRITA I	FeS_2				
PIRITA II	FeS_2				
MARCASITA	FeS_2				
TETRAEDRITA	$(Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}$				
TENNANTITA	$(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}$				
SULFOSALES DE PLATA					
GALENA	PbS				
ESFALERITA	ZnS (~10 %Fe)				
CALCOPIRITA II	$CuFeS_2$				
BOULANGERITA	$Pb_{55}Sb_{45}S_{11}$				
BOURNONITA	$PbCuSbS_3$				
CUARZO	SiO_2				
CARBONATOS					
SIDERITA	$FeCO_3$				
CALCITA (Mg)	$MgCaCO_3$				
RODOCCROSITA	$MnCO_3$				
BARITINA	$BaSO_4$				
MOSCOVITA (SERICITA)	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$				
ILLITA	$(K, H_3O)[Al, Mg, Fe]_2(Si, Al)_4O_{10}$				
DICKITA	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$				
CAOLINITA	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$				
MANGANITA	$Mn_3O(OH)$				
ANGLESITA	$PbSO_4$				
CERUSITA	$PbCO_3$				
MELANTERITA	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$				
GOETHITA y HEMATITA	$Fe_3O_4(OH)$ y Fe_2O_3				

Figura 12. Estadios de mineralización del proyecto Zoraida. Tomado de “Principales estadios de mineralización del yacimiento polimetálico tipo cordillerano, proyecto Zoraida-U.P. Andaychagua, Volcan Compañía Minera S.A.A. Junín - Perú” por R. Supa, 2021.

3.2.3. Distrito minero de Morococha

El distrito minero de Morococha está situado en la provincia de Yauli, ubicada en el departamento de Junín, a unos 150 km al este de Lima y aproximadamente a 38 km al oeste de La Oroya, que es la capital de la provincia de Yauli. Esta región está situada a altitudes que oscilan entre los 4375 y 5290 metros sobre el nivel del mar. El yacimiento está caracterizado por la contener depósitos económicamente significativos de minerales polimetálicos (Zn-Pb-Ag-Cu) en forma de vetas cuerpos de reemplazamiento, así como la presencia del extenso depósito porfídico de Cu-Mo (Toromocho) en su núcleo (Catchpole et al. 2015). Los pórfidos de composición diorítica a granodiorítica intruyen a las rocas volcánico-sedimentarias del Triásico, mayoritariamente constituidas por andesitas (Grupo Mítu), así como en las formaciones carbonatadas sedimentarias del Triásico-Jurásico (Grupo Pucará) y en las formaciones carbonatadas sedimentarias del Cretácico Tardío. Vetas altamente mineralizadas con Zn-Pb-Ag-Cu, que poseen una inclinación pronunciada, se encuentran alojadas en fracturas que se orientan en dirección NNE a ENE; estas vetas atraviesan las rocas intrusivas porfídicas y el resto de litologías en todo el distrito (Catchpole et al. 2011).

Según Catchpole et al., (2011) se pueden distinguir tres etapas paragenéticas principales (Figura 13): una etapa temprana estéril de cuarzo-pirita, una etapa compuesta de metales base y una etapa tardía de carbonatos. Al principio de la etapa de metales base, pirita y cantidades menores de enargita y estannoidita cristalizan en la subetapa de Fe-Cu-As-Sn; la tenantita y cantidades mínimas de esfalerita continúan en la subetapa de Cu-Zn; la esfalerita pobre en hierro y la galena cristalizan como la subetapa de Zn-Pb de la mineralización de metales base. Los minerales económicamente importantes que contienen Ag son la tenantita-tetraedrita, y pequeñas cantidades de hessita que ocurren como inclusiones en la galena pobre en Ag. Las dos primeras etapas se

encuentran asociadas con alteración sericítica de la roca andesítica del grupo Mitu, mientras que los fluidos de la etapa de carbonato neutral no afectan la roca anfitriona.

La zonación de metales reconocida en vetas individuales, donde los minerales ricos en Cu y Fe precipitan temprano, seguidos por los minerales de Zn, Pb, Ag y Mn en una secuencia paragenética posterior, también se observa en la distribución a nivel de distrito de los principales metales en las vetas de metales base en el distrito de Morococha. Se destaca una zona central rica en Cu que sobresale de la intrusión porfídica de San Francisco Cu-Mo, la cual es subeconómica, mientras que los minerales de Zn, Pb, Ag y Mn ganan importancia hacia las partes externas del distrito. En la zona central rica en Cu, no se encuentra presente la rodocrosita de la etapa de carbonatos.

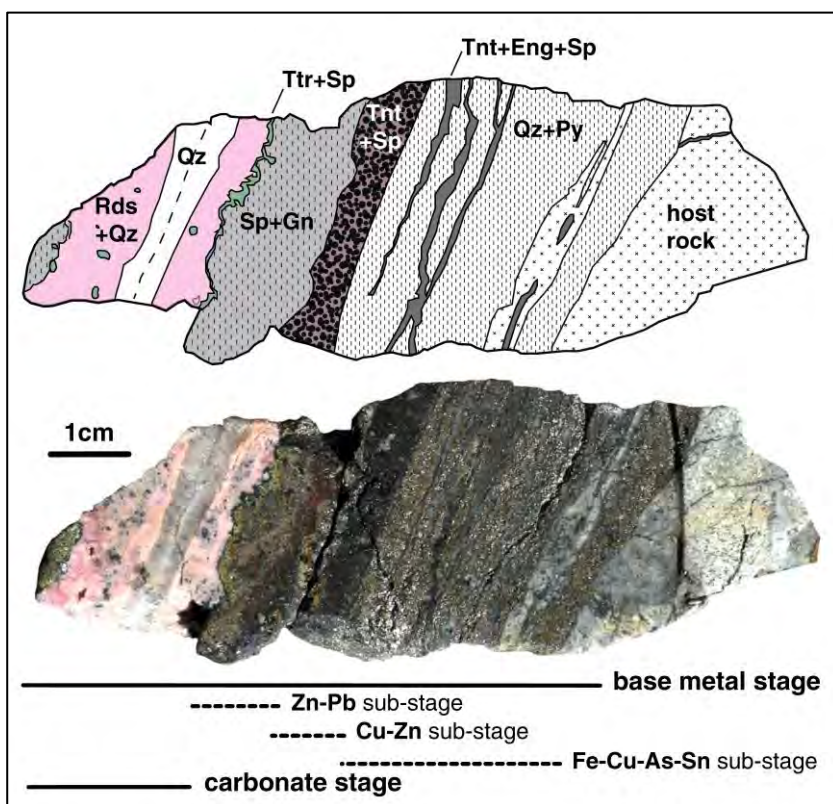


Figura 13. Muestra de una veta polimetálica cordillerana bien zonada con cuarzo-pirita y etapa de metales base, que incluye varios subestadios; el esquema muestra las principales zonas minerales con sus respectivas asociaciones minerales. Ccp representa la calcopirita, Eng la enargita, Gn la galena, Py la pirita, Qz el cuarzo, Rds la rodocrosita, Sp la esfalerita, Tnt la tenantita y Ttr la tetrahedrita. Tomado de “Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru” por H. Catchpole et al., 2015.

3.3. Marco Conceptual

-Histograma: Es un gráfico que representa una variable estadística que utiliza barras, donde la altura de cada barra indica la frecuencia de los valores asociados. Este tipo de gráfico se utiliza para visualizar de manera general cómo se distribuyen los valores en una población o muestra (Pearson, 1895).

-Distribución normal o gaussiana: Es un modelo de probabilidad continua que se destaca por su forma de campana. Se emplea extensamente en campos como la estadística y varias ciencias debido a su presencia generalizada y sus propiedades matemáticas beneficiosas. Sus elementos fundamentales incluyen la media y la desviación estándar, que determinan el centro y la extensión de la dispersión de los datos.

-Análisis Exploratorio de Datos: consiste en una revisión de la base de datos antes de aplicar cualquier técnica estadística, esto permite al analista adquirir una comprensión fundamental de la base de datos y de las interconexiones entre las variables examinadas (Figueras & Gargallo, 2003).

-Coeficiente de correlación lineal de Pearson: Es un método empleado para evaluar la relación estadística entre dos variables de naturaleza continua. Este coeficiente abarca un intervalo de valores que va desde +1 hasta -1. Un valor de 0 indica la ausencia de correlación entre las dos variables. Un valor superior a 0 indica una correlación positiva, lo que sugiere que a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace. En contraste, un valor inferior a 0 indica una correlación negativa, indicando que, al aumentar una variable, la otra disminuye (Orellana, 2001).

-Análisis Geoestadístico: El análisis geoestadístico se emplea en disciplinas como la geología y otras ciencias terrestres para examinar información que tiene una relación espacial, como la forma en que los minerales se distribuyen en una determinada área geográfica, el análisis

geoestadístico facilita la creación de modelos y predicciones acerca de cómo varían los datos en el espacio, ayudando a comprender patrones geoespaciales (Matheron, 1963).

-Análisis geoquímico: constituye un enfoque indirecto para la búsqueda y evaluación de yacimientos minerales, centrándose en identificar la presencia y cantidad de elementos específicos, como los elementos indicadores vinculados a un depósito mineral (Rivera, 2005).

-Metalogenia: Es un campo dentro de la geología que se enfoca en investigar el origen de los depósitos minerales, su conexión con las rocas circundantes, las formaciones geológicas que los influyen y las reglas que determinan cómo se distribuyen (Ponzoni, 1980).

-Franja metalogenética: Se refiere a un área de la Tierra que se caracteriza por la existencia de depósitos minerales metálicos de un tipo particular. (Ponzoni, 1980).

-Feeders. Este término se emplea para describir una estructura o conducto por donde se transportan fluidos magmáticos hacia la superficie (Dávila, 2011).

-Diatrema: Es un conducto cilíndrico, que puede variar en su verticalidad, situado en la litosfera terrestre y por el cual han transitado materiales magmáticos. (Dávila, 2011).

-Centro volcánico: Es el punto de salida hacia la superficie de los materiales volcánicos, ya sea en forma de lava o piroclásticos, que se originan en las cámaras magmáticas. En ocasiones, se les denomina conductos o conos volcánicos. (Dávila, 2011).

-Complejo volcánico: Es una estructura que se conforma por dos o más centros volcánicos, resultado de la actividad de un volcán durante un largo período temporal, y pueden ser el resultado de erupciones repetidas en el mismo lugar o de una serie de erupciones en una región cercana.

-Fluido hidrotermal: Hace referencia a una solución de elementos que fluye en el subsuelo de la litosfera terrestre y está vinculada con las fases posteriores del volcanismo o las etapas culminantes de la solidificación del magma (Dávila, 2011).

-Stock: Plutón granítico de pequeño tamaño.

-Veta o filón: Es la intrusión de rocas ígneas, típicamente de origen volcánico, en una forma que se asemeja a un prisma rectangular. Esta inserción ocurre a través de una roca previamente existente, que puede tener un origen ígneo, sedimentario o metamórfico. En términos equivalentes, el término "filón" puede ser usado en lugar de "dique" o "veta" (Dávila, 1995).

-Paragénesis mineral: Se refiere a minerales que se hallan en conjunto en una roca, originados por el mismo proceso de formación durante una fase geológica específica. Estos minerales están vinculados en términos de tiempo y génesis (Nesse, 1999).

-Ensamble mineralógico: Se definen como conjuntos de minerales que están en contacto directo y no presentan signos de reacción mutua (Barton et al., 1963).

-Asociación mineral: Se aplica a grupos de minerales que son característicos de una zona de alteración o de una parte de un sistema de vetas, pero que no están todos en contacto y no necesariamente se depositaron al mismo tiempo (Einaudi et al., 2003).

-Textura mineralógica: Dimensiones, configuración y distribución de los minerales que componen las rocas (Dávila, 2011).

-Sulfuros: Se compone de las uniones de metales con azufre, selenio o telurio. La mayoría de los minerales metálicos pertenecen a esta categoría (Dana, 1848).

-Sulfosales: Minerales que contienen plomo, cobre o plata en asociación con azufre, así como antimonio, arsénico o bismuto (Dana, 1848).

-Cobres grises: Minerales que contienen cobre y plata, junto con arsénico, antimonio y azufre. Se forman en entornos hidrotermales, ya sea en filones o en depósitos sedimentarios.

-Falla: Es el desplazamiento de un bloque de roca en relación con otro que se encuentra adyacente, o incluso el movimiento de los dos bloques, a lo largo de un plano conocido como

"plano de falla". Estas fallas se originan debido a tensiones tectónicas generadas por procesos como la epirogénesis, la orogenia, el diastrofismo, La tectónica de placas o cualquier otro tipo de movimiento en la corteza terrestre puede ocasionar fallas, las cuales resultan en la perturbación de las formaciones geológicas (Dávila, 2011).

-Estrías de falla: Es una formación lineal que aparece en un plano de falla debido a la interacción entre dos bloques en movimiento, lo que da lugar a la recrystalización de minerales en esos mismos planos de falla (Caldera, 2016).

-Facies: Describe el conjunto de características físicas, químicas, ambientales y paleontológicas que estuvieron involucradas en la formación de depósitos litológicos (Dávila, 2011).

-Brecha monomítica: Es una brecha que se caracteriza principalmente por su composición, ya que está compuesta por fragmentos de una sola litología (Dávila, 2011).

-Brecha polimítica: Es una brecha que se caracteriza principalmente por su composición, ya que está compuesta por fragmentos de distintas litologías (Dávila, 2011).

-Roca calcoalcalina: Es una roca ígnea que se forma en zonas de subducción y se distingue por su alta concentración de sílice o sobresaturación de sílice

-Roca buffer: El término "roca buffer" se puede describir como la suma de minerales formadores de rocas que interactúan con un fluido hidrotermal a temperaturas submagmáticas y median su estado de sulfuración-oxidación y acidez total (Barton, 1970; Hemley y Hunt, 1992). Los minerales que probablemente estén involucrados como buffers son los minerales ferromagnesianos con hierro en diferentes estados de valencia: Fe+2 en piroxeno, olivino, biotita y magnetita; Fe+3 en biotita y magnetita. (Giggenbach, 1987)

3.4. Marco Legal

Los siguientes artículos de la Constitución Política del Perú, Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la UNMSM facilitan la exploración del marco jurídico que guía y asegura la legalidad de la educación y de la presente investigación.

3.4.1. Constitución Política del Perú

La base de la educación y la investigación en Perú descansa en la Constitución Política del país. El capítulo II, Art. 17 y 18 que describen lo siguiente:

Artículo 17°. La educación en las etapas inicial, primaria y secundaria es de carácter obligatorio. En las instituciones educativas estatales, la enseñanza es gratuita. En el ámbito de las universidades públicas, el Estado asegura el derecho a la educación gratuita para los estudiantes que mantengan un desempeño satisfactorio y carezcan de recursos económicos para cubrir los costos educativos.

Artículo 18°. La educación universitaria tiene como objetivos la formación profesional, la difusión cultural, la creación intelectual y artística, así como la investigación científica y tecnológica. El Estado garantiza la libertad de enseñanza y condena la intolerancia.

La presente investigación se fundamenta también en la Ley Universitaria N° 30220 capítulo V, Art. 36 y 45; capítulo VI, Art. 48 que describen lo siguiente:

Artículo 36. Función y dirección de la Escuela Profesional

La Escuela Profesional, o su equivalente, es la entidad responsable de elaborar y actualizar el plan de estudios de una carrera profesional, así como de supervisar su implementación, con el propósito de brindar la formación y entrenamiento adecuados hasta que se obtenga el grado académico y el título profesional correspondiente..

Artículo 45. Obtención de grados y títulos

La obtención de grados y títulos sigue los requisitos académicos determinados por cada universidad en sus normativas internas respectivas. Los requisitos mínimos incluyen lo siguiente::

45.2 Título Profesional: La obtención del título profesional implica poseer el grado de Bachiller y completar con éxito una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Las instituciones universitarias acreditadas pueden establecer modalidades adicionales a estas mencionadas anteriormente. Es importante destacar que el título profesional solo puede obtenerse en la universidad donde se haya obtenido el grado de bachiller.

Artículo 48. Investigación

La investigación representa una función esencial y obligatoria de la universidad, siendo promovida y llevada a cabo con el propósito de abordar las necesidades de la sociedad mediante la generación de conocimiento y el desarrollo de tecnologías. Se enfatiza especialmente en la realidad nacional. Los profesores, estudiantes y graduados participan activamente en actividades de investigación, ya sea dentro de su propia institución o en redes de investigación a nivel nacional o internacional, creadas por instituciones universitarias tanto públicas como privadas..

3.4.2. Estatuto de la UNMSM, 2016

La elaboración de este trabajo de investigación también se fundamenta en el estatuto de la U.N.M.S.M. 2016, aprobado con Resolución Rectoral N° 03013-R-16 en junio del 2016. El capítulo II, Art. 35; capítulo IV, Art. 102; 113, 120; el capítulo V, Art. 185 describen lo siguiente:

Artículo 35°. Funciones del Vicedecanato de Investigación y Posgrado. Estas funciones son las siguientes:

- a) Coordinar y estructurar las tareas de investigación, así como aquellas vinculadas a los resultados de los estudios de investigación de los institutos y la unidad de posgrado.
- b) Estimular la integración y crecimiento de todos los docentes en el ámbito de la investigación.

c) Fomentar la participación de los estudiantes de pregrado en las actividades de investigación educativa.

d) Estimular la divulgación y difusión de los trabajos de investigación, tesis, patentes, artículos y otros documentos afines.

Artículo 102°. La tutoría implica guiar y acompañar a los estudiantes en su progreso académico, siendo un elemento esencial en la labor educativa que debe integrarse en los programas de estudios tanto de pregrado como de posgrado. Además, debe formar parte de las asesorías de tesis y ser considerada como parte de la carga académica de los profesores.

Artículo 113°. Los requisitos académicos establecidos por la universidad para la obtención de certificaciones, grados y títulos son los siguientes:

c) Título profesional: La obtención del título profesional implica contar con el grado de bachiller y la aprobación de una tesis que refleje la primera experiencia académica y/o profesional del estudiante. Cabe señalar que la Universidad Nacional Mayor de San Marcos otorga el título profesional únicamente a aquellos que hayan obtenido el grado de bachiller en dicha institución.

Artículo 120°. La elaboración de la tesis, tanto en el pregrado como en el posgrado, es un componente esencial de investigación necesario para la obtención del título profesional y los grados de maestro y doctor. Esta relevancia se reflejará en los recursos asignados por la universidad para impulsar su desarrollo y en el respaldo para obtener financiamiento de otras fuentes.

Artículo 185°. Los estudiantes de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos poseen los siguientes derechos:

s) La exención de costos, en una única ocasión, para la asesoría, elaboración y presentación de su trabajo de investigación con el fin de obtener el grado de bachiller, así como para la tesis requerida para obtener el título profesional

4. CAPÍTULO IV. HIPÓTESIS Y VARIABLES

4.1. Hipótesis

4.1.1. General

-La determinación de las características geológicas (litológica, estructuras geológicas, geoquímica y mineralogía,) de la veta Pierina, ayudará a orientar y seguir la exploración y sumar a la explotación.

4.1.2. Específicas

-Es posible estudiar la geología local, que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica y mineralogía de la veta Pierina.

-Las características geológicas de la veta Pierina se pueden analizar y relacionar para identificar sus eventos mineralizantes, su génesis y proponer el modelo o tipo de yacimiento al cual pertenece.

-La orientación de la exploración geológica estará en función a la geología local y al tipo de yacimiento de la veta Pierina.

4.2. Identificación de Variables

4.2.1. Independiente

-Estudio geológico de la veta Pierina.

4.2.2. Dependiente

-Yacimiento minero Huinac, UEA Admirada Atila, Aija, Ancash, Perú

5. CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Enfoque, Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación

Para demostrar mis hipótesis y cumplir los objetivos que me tracé, así como también generar las conclusiones y recomendaciones de mi tesis, desarrollé la siguiente metodología, considerando que la presente investigación es cuantitativa-aplicativa, pues elaboro una data para analizarla a través de programas estadísticos, empleando conocimientos básicos, como es la descripción de las propiedades y/o características de la geología local, para posteriormente explicar su génesis, el diseño se hizo con modelos experimentales en campo analizando las propiedades fisicoquímicas de las rocas, estructuras geológicas y suelos.

5.2. Desarrollo de la Investigación

5.2.1. Recopilación de información

-Búsqueda, recopilación, evaluación y validación de información geológica regional y local, en diversas investigaciones efectuadas en la región de estudio o alrededor de ella.

-Digitalización y georreferenciación de mapas y planos antiguos, creación y preparación de mapas topográficos destinados al mapeo geológico, así como la delimitación de áreas para la recolección de muestras de campo y para análisis microscópicos..

5.2.2. Trabajos hechos en campo

-Cartografiado geológico superficial y subterráneo a escala 1:250 de toda el área de influencia de nuestro objeto de estudio.

-Elaboración de canales para muestreo

-Extracción de muestras para estudios macro y microscópicos.

-Toma de fotografías.

5.2.3. Elaboración de planos y análisis e interpretación de los datos plotados

- Análisis macroscópicos y microscópicos de las muestras extraídas.
- Digitalización e interpretación del cartografiado geológico.
- Elaboración de los modelos geológicos.
- Tratamiento geoestadístico y análisis de datos geoquímicos.
- Elaboración de planos y secciones geológicas y anomalías geoquímicas.
- Análisis, interpretación y correlación de las propiedades litológicas, estructurales, mineralógicas y geoquímicas de las rocas y minerales para definir su génesis del yacimiento de minerales.
- Elaboración de mi tesis.

6. CAPÍTULO VI. GEOLOGÍA REGIONAL

Esta información ha sido tomada de los trabajos ya publicados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), los cuales indican que la zona de estudio se encuentra ubicada en el flanco oriental de la cordillera negra, regionalmente los alrededores de la mina están constituidos principalmente por extensos y gruesos depósitos volcánicos y volcanoclásticos que forman parte del grupo Calipuy inferior y superior, sedimentados desde el Eoceno superior hasta el Mioceno inferior. Tenemos también afloramientos de formaciones pertenecientes al Grupo Goyllarisquizga depositados desde el Valanginiano hasta el Aptiano y de la formación Chicama, asimismo se tienen intrusivos del Neógeno además de paquetes de depósitos glaciares y fluviales. Los eventos estructurales predominantes en la zona han implicado la compresión y plegamiento del basamento sedimentario, seguidos por la actividad eruptiva del volcanico Calipuy, que se manifiesta en dos centros volcánicos, según se muestra en las figuras 14 y 15.

6.1. Estratigrafía

6.1.1. Facies Sedimentarias

6.1.1.1. Formación Chicama

Litológicamente la formación Chicama es variable en distintas zonas, se tiene la presencia de estratos de areniscas oscuras, estas areniscas alcanzan más de 600 m de espesor, esta arenisca tiene similitudes a las areniscas de la formación Chimú que suprayace a esta formación; se tiene también pizarras negras comúnmente piritosas, sin embargo, esta formación contiene principalmente lutitas gris oscuras a negras, pizarrosas con intercalaciones de areniscas (Cobbing et al., 1996).

Wilson (1967) encontró en esta formación distintos fósiles de ammonites *Perisphinctes*, *Berriasella* y *Aspidoceras* los cuales son indicativos de una edad titoniana. Cobbing et al. (1996) también reportó la presencia de fragmentos de los fósiles mencionados anteriormente, las

investigaciones realizadas han proporcionado evidencia suficiente para validar la edad titoniana. La formación Chicama puede establecerse como correlacionada con el grupo Puente Piedra, así como con el Grupo Yura al sur del Perú (Cobbing et al., 1996).

6.1.1.2. Grupo Goyllarisquizga

Es un conjunto de formaciones que se encuentran distribuido a manera de una franja con dirección similar a la cordillera de los Andes, este grupo se divide de la siguiente manera:

Formación Chimú

Esta formación se distingue por su morfología conspicua y su tonalidad que va desde el blanco hasta el blanco rojizo, presenta una tonalidad rojiza clara. En esta formación, se identifican estratos de areniscas blancas, consistentes y dispuestas en capas de 1 a 3 metros de grosor. El espesor total de la secuencia de esta formación oscila entre 600 metros y 100 metros. (Cobbing et al., 1996).

Esta formación es concordante con la formación Oyón e infrayace a la formación Santa también de forma concordante. La formación Chimú no contiene fósiles marinos fiables, pero como sobreyace concordantemente a la formación Oyón de edad Neocomiano e infrayace concordantemente a la formación Santa del Valanginiano superior, se le asigna la edad Valanginiano inferior a medio (Cobbing et al., 1996).

Formación Santa

Está caracterizada por presentar calizas de color azul grisáceo, cuando está meteorizada presenta corteza azulina; el espesor de sus capas va de 0.1 m a 1 m; a veces presentan concreciones de Chert de color gris oscuro a blanco; no es común encontrar fósiles en esta formación, pero contiene fragmentos de conchas; el espesor total de esta unidad es regularmente constante de 100 a 150 metros (Cobbing et al., 1996).

De acuerdo a Wilson (1967) los fósiles encontrados no son estratigráficamente característicos, sin embargo, se atribuye una edad de Valanginiano superior a la formación Santa, basándose en su posición estratigráfica con respecto a la formación Carhuaz. Aunque la formación Santa se correlaciona con la parte superior del Grupo Morro Solar y con la parte inferior de la formación Pamplona, las notables diferencias litológicas entre estas áreas geográficamente distantes sugieren que ambas formaciones se desarrollaron en cuencas separadas. (Cobbing et al., 1996).

Formación Carhuaz

La formación Carhuaz se encuentra en posición concordante sobre la formación Santa y, a su vez, se sitúa concordantemente por debajo de la formación Farrat. Predominan las limoarcillitas y limolitas en su composición, con la adición de estratos de arenisca cuarcífera en la región central de la unidad. Las limoarcillitas presentan principalmente tonalidades de gris a gris-verde, y ocasionalmente se pueden hallar capas delgadas de yeso en la parte inferior de la formación. (Cobbing et al., 1996). El espesor de la formación va de 600 a 1500 metros (Wilson, 1967)

La formación Pamplona, que se extiende desde Lima hasta el río Cañete, muestra cierta correlación con la formación Carhuaz, establecida en gran medida por el análisis del contenido fosilífero (Wilson, 1967), esta formación se considera de edad Hauteriviana - Barremiano.

Formación Farrat

La formación Carhuaz está mayormente compuesta por areniscas de grano medio fácilmente desgastables y, en ocasiones, puede presentar limoarcillitas en lugar de areniscas. Esta unidad geológica se sitúa directamente sobre la formación Carhuaz, y su espesor típico es de aproximadamente 20 metros (Cobbing et al., 1996). La Formación Farrat, carente de evidencia fósil, se data en función de su disposición estratigráfica, ubicándose en el Aptiano al encontrarse

por debajo de la formación Pariahuanca del Albiano inferior y por encima de la formación Carhuaz del Barremiano (Cobbing et al., 1996).

6.1.2. Facies Volcánicas

Las fases sedimentarias del área estudiada se encuentran cubiertas por material volcánico del grupo Calipuy depositados desde el final del Eoceno hasta el inicio del Mioceno. El arreglo espacial de las estructuras volcánicas como calderas, estratovolcanes y domos pertenecientes al Grupo Calipuy estuvieron sometidos a la configuración de sistemas de fallas regionales con rumbo NO-SE preexistentes (Ordoñez et al., 2013). La zona estudiada está influenciada por el centro volcánico Pupanday y del complejo volcánico Huinoc-Alto Ruri pertenecientes al grupo Calipuy.

6.1.2.1. Centro Volcánico Pupanday

Según Chavez et al. (2010) este centro volcánico se constituye por cinco fases eruptivas.

1- Depósitos de flujos piroclásticos con composición dacítica de tono gris verdoso y textura porfirítica se encuentran debajo de capas de flujos piroclásticos de cenizas ricas en cristales, que presentan un color gris pardusco.

2- Capas de flujos de lava con composición andesítica, de tonalidad gris oscura y textura porfirítica, se encuentran debajo de depósitos de flujos piroclásticos de cenizas, con tonos que varían entre gris blanquecino y verdoso, también con textura porfirítica, y contienen algunos fragmentos líticos lávicos de textura afanítica.

3- Capas de flujos de lava, compuestas mayormente de andesita, con tonalidades que van desde gris oscuro hasta violáceo, están debajo de depósitos de flujos piroclásticos que contienen bloques y cenizas, con colores que varían entre gris violáceo y verdoso, tienen textura porfirítica.

4- Capas de flujos de lava, compuestas de andesita y con una tonalidad gris azulina y textura porfirítica, se encuentran cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos que contienen cenizas con

abundantes cristales, de tono gris blanquecino y textura porfirítica. Encima de estos, se presentan depósitos flujos piroclásticos con bloques y cenizas de color gris violáceo, con textura porfirítica.

5- La fase final se caracteriza por capas de flujos de lava, constituidas por andesita y presentando una tonalidad gris azulina con texturas que varían desde afíricas hasta porfiríticas. A esto le sigue una secuencia de depósitos de flujos piroclásticos, compuestos de cenizas con cristales en abundancia, de tono gris blanquecino y con textura porfirítica. En estos depósitos, finalmente se tiene depósitos de flujos de bloques y cenizas, de color gris violáceo y textura porfirítica.

Las secuencias del centro volcánico Pupanday se disponen sobre los sedimentos de las formaciones Chicama y Casma en discordancia angular, mientras que, a su vez, se encuentran por debajo de los depósitos del complejo Volcánico Huinoc-Alto Ruri. Aunque no existen informes de edades radiométricas para las rocas volcánicas de este centro eruptivo, su posición por encima del plutón Pariacoto, que tiene una edad en Rb/Sr de 48.7 ± 0.5 Ma en roca total, sugiere que es más reciente en términos geológicos (Beckinsale et al., 1985), a este centro volcánico se le asigna una edad del Eoceno superior (Chavez et al., 2010).

6.1.2.2. Complejo volcánico Huinoc – Alto Ruri

Se compone por la superposición de dos volcanes ya erosionados, los cuales fueron producto de siete eventos eruptivos (Chavez et al., 2010).

Según Chavez et al. (2010) el centro volcánico más antiguo es denominado Huinoc y comprende los cuatro primeros eventos.

1- Se tiene flujos piroclásticos de cenizas de tonalidad gris blanquecina, con textura porfirítica.

2- Se identifica una sucesión de flujos de lavas andesítica, presentando una variación de color desde gris oscuro hasta negro, los cuales se encuentran por debajo de los depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de tonalidad gris violácea y textura porfirítica.

3- Depósitos de flujos piroclásticos compuestos por pómez y cenizas muestran una tonalidad gris claro verdosa y una textura porfirítica, con la presencia de pómez fibrosas. Estos depósitos alternan con capas de flujos piroclásticos de cenizas, de color gris claro violáceo y también con textura porfirítica. Además, se encuentran flujos de bloques y cenizas de tono gris violáceo, destacando su textura porfirítica, y se caracterizan por ser monomícticos.

4- Capas tabulares de flujos de lava, cuya composición es andesítica y su tonalidad gris pardusca con textura porfirítica, se encuentran intercaladas con depósitos de flujos piroclásticos de cenizas ricos en cristales de color gris verdoso y textura porfirítica. También se observan horizontes de depósitos de caída de cenizas.

El centro volcánico Alto Ruri se superpone en parte al centro volcánico Huinoc. Según Chavez et al. (2010) este centro comprende tres eventos.

1- Flujos piroclásticos compuestos por pómez y cenizas, ricos en cristales, de tonalidad gris verdosa, con una textura porfirítica, conteniendo tanto pómez densa como variedades fibrosas.

2- Flujos de lava compuestos por andesita de tonalidad gris azulina y textura afanítica, superpuestos por flujos piroclásticos de cenizas, de color gris pardusco y textura porfirítica

3- Depósitos de flujos de lava compuestos por andesita, de tonalidad gris negruzca y textura porfirítica; recubiertos por flujos piroclásticos de pómez y cenizas, de color gris claro verdoso y abundantes en fragmentos líticos afaníticos.

Las secuencias del centro volcánico Huinoc se disponen encima de depósitos correspondientes a las últimas erupciones del centro volcánico Pupanday y se sitúan por debajo de los depósitos vinculados a las erupciones del centro volcánico Huarancayoc. Asimismo, los depósitos de la base del centro volcánico Alto Ruri son afectados por la intrusión de un domo dacítico, cuya edad en biotita se ha determinado como 18.1 ± 1.2 Ma mediante el método K/Ar (Farrar y Noble, 1976).

De acuerdo con lo expuesto, el complejo volcánico Huinoc-Alto Ruri tiene una edad comprendida entre el Oligoceno superior (Huinoc) y el Mioceno inferior (Alto Ruri) (Chavez et al., 2010).

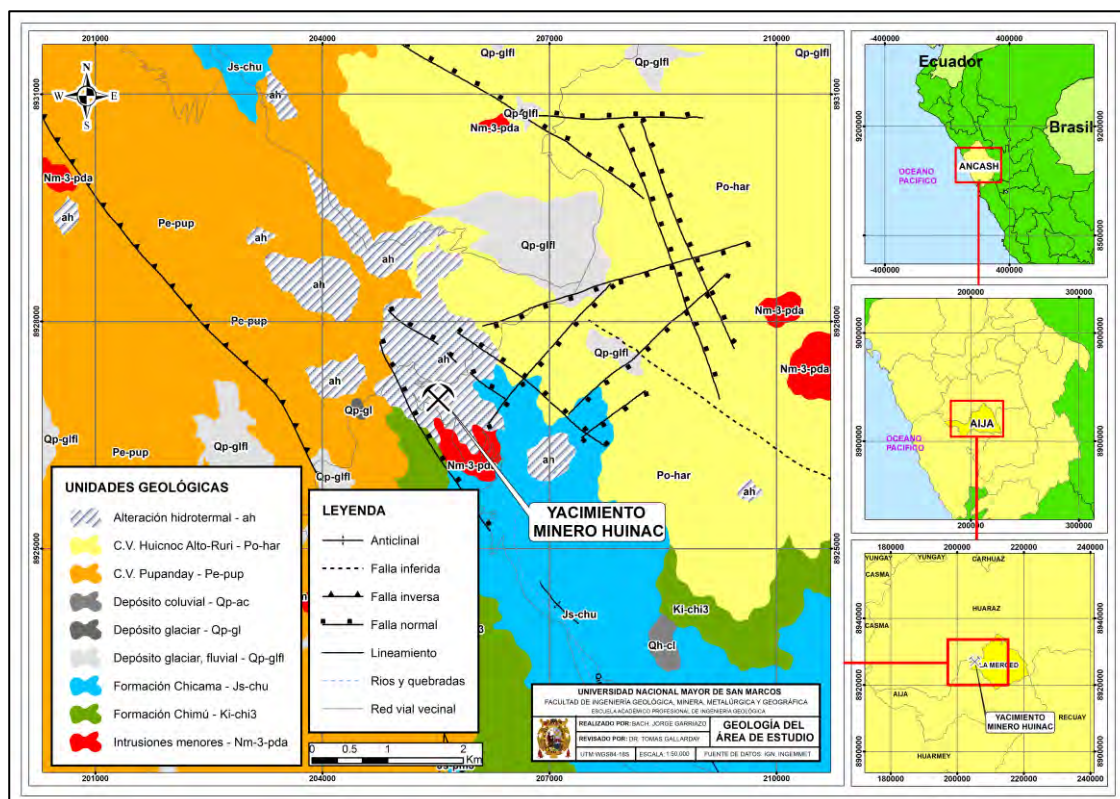


Figura 14. Mapa geológico del área de estudio. Muestra las unidades geológicas correspondientes a la zona de estudio. Mapa redibujado del INGEMMET.

CUADRO ESTRATIGRAFICO									
M.A.	EON	ERA	SISTEMA	EPOCA	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	SIMBOLOGIA	ROCAS INTRUSIVAS		
0.0118	FANEROZOICO	CUATERNARIO	Holoceno		Depósitos eólicos, fluviales, coluviales, aluviales	Q-a	Nm-pc	Rpt. Cuarcífero	
1.8					Depósitos fluvio-glaciares, glaciares, lagunares	Q-g			
5.332			Neógeno	Mioceno	Volcánico Huarangavoc	Nm-3-pda			
					Volcánico Huinoc-Alto Ruri	Nm-3-pda			
33.9+/-0.1		PALEOGENO	Oligoceno	Grupo Calipuy	Volcánico Fucsurca	Pe-pup	Po-di	Diorita	
55.8+/-0.2					Volcánico Liama	Pe-pup			
66.5+/-0.3					Volcánico Pupanday	Pe-pup			
					Formación Farrat	Ki-chi3			
145.5+/-4	MESOZOICO	CRETACEO	Inferior	Grupo Goyllarisquiza	Formación Carhuaz	Ki-chi3	Pe-da	Dacita	
161.2+/-4					Formación Santa	Ki-chi3			
					Formación Chimú	Ki-chi3			
		Jurásico	Superior		Formación Chicama	Js-chu			

Figura 15. Tabla cronoestratigráfica de la zona de estudio. Muestra la relación cronoestratigráfica de las unidades geológicas del área de estudio. Redibujado por el autor del INGEMMET.

6.2. Rocas intrusivas

Se presenta una serie de cuerpos intrusivos o stocks al este del batolito de la costa, los cuales están emplazados en las formaciones sedimentarias y volcánicas de la cordillera Negra. La dimensión de estos afloramientos abarcan hasta 10 km², mientras que otros, como los plutones de Pira y Corpanqui, presentan dimensiones aún mayores. Estas intrusiones están dispersas de manera irregular en una extensa área y no se concentran en zonas alineadas. (Cobbing et al., 1996).

A pesar de su amplia separación geográfica, estos stocks comparten similitudes significativas en términos de litología. Al examinar muestras de mano, se observa que son predominantemente porfíricos, con fenocristales de plagioclasa que alcanzan aproximadamente los 2 cm de longitud. La presencia de cuarzo es común, con granos redondeados de tamaño similar, aunque en algunos de estos stocks el cuarzo no es visible. La presencia de biotitas negras brillantes con hábito laminar y cristales de hornblenda prismática negra es frecuente, pero no es una característica constante. La matriz está compuesta por granos muy finos de cuarzo, plagioclasa y feldespato alcalino, con una composición monzonítica. En casos de alteración por fluidos hidrotermales, la roca muestra coloraciones claras y suele estar caolinizada; en estas instancias, el stock contiene sulfuros diseminados. Cuando la composición de las rocas es de micromonzonitas-porfíricas, el porcentaje de fenocristales varía entre el 10% y el 50% por volumen, siendo las plagioclasas las más abundantes. La variabilidad en la abundancia de fenocristales es distinta para cada uno de los stocks; no obstante, la composición de la matriz permanece casi constante. Aunque estos stocks comparten características comunes, están distribuidos en áreas extensas, por lo que es más apropiado analizarlos de manera individual. Estos stocks se superponen tanto en tiempo como en espacio con el grupo Calipuy. Aunque no se puede afirmar con certeza si son co-magmáticos, es evidente que este plutonismo ocurrió entre el Paleógeno y el Neógeno y está estrechamente

vinculado a la mineralización polimetálica en esta región (Cobbing et al., 1996). A continuación, se detalla los stocks o intrusiones cercanos al área de estudio.

6.2.1. Stock de Pira

Tiene una composición tonalítica-granodiorita, se encuentra en las proximidades del pueblo de Pira, emplazándose entre las rocas de las formaciones Santa y Carhuaz y en los volcánicos del grupo Calipuy. Este emplazamiento ha causado cierta alteración en los volcánicos de la parte occidental, donde se ha identificado un depósito diseminado. La tonalita presenta características como grano medio a fino, mesocrática, con plagioclasas, cuarzo y biotita en hojuelas distribuidas de manera irregular. Aunque su litología es homogénea, puede variar con un aumento del contenido de feldespatos potásicos, llegando a ser una granodiorita (Cobbing et al., 1996).

6.2.2. Stock de Huanchay

Según Cobbing et al. (1996) a 1 km al sureste del pueblo de Huanchay, en la confluencia de las quebradas Huanchay y Agua Salada, se localiza una intrusión de tonalita mesócrata a granodiorita leucócrata con un tamaño de grano que varía entre medio y fino. Sus componentes principales incluyen plagioclasas, hornblendas, biotitas, cuarzo y un contenido reducido de feldespatos potásicos. Las características texturales son semejantes a las de los stocks presentes en Hacienda Rumasca y Pira, ubicados a unos 15 km al norte y noreste, respectivamente. Aunque la mayoría de sus afloramientos están cubiertos por depósitos cuaternarios, lo que dificulta la observación precisa de sus contactos, se presume que podrían estar emplazados dentro del Calipuy inferior.

6.2.3. Stocks de Huacllan y Huayán

Están situados en las formaciones rocosas del grupo Calipuy, y ambos consisten en tonalitas, monzodioritas y granodioritas de grano medio que se manifiestan en las zonas más bajas de las ubicaciones mencionadas. La relación intrusiva entre ellos no es evidente a simple vista. En

Huacllan, se identifica una monzodiorita-tonalita ligeramente más alterada, y no se observa un efecto notable de metamorfismo de contacto (Cobbing et al., 1996).

6.2.4. Stock Mina Huinac

Localizado a aproximadamente 15 km al norte de Aija, este cuerpo se posiciona entre las lutitas Carhuaz y los Volcánicos Calipuy. Se manifiesta en forma de varios stocks y diques de dimensiones reducidas. La composición corresponde a un pórfido que incluye biotita, plagioclasa y cuarzo, con frecuencia alterado y con presencia de sulfuros diseminados. (Cobbing et al., 1996).

6.2.5. Stocks de Aija - Recuay

Entre estas dos localidades se identifica un sistema de intrusivos complejo que ha penetrado en las rocas del Calipuy. Una de las intrusiones más destacadas se localiza en las cercanías del pueblo de Aija, a aproximadamente 3 km al este. Se trata de un monzogranito cristalino que comparte algunas similitudes con los plutones presentes en el Batolito de la Costa, en el tope esta intrusión se presenta como diques y sills emplazadas dentro de volcánicos, los cuales están muy alterados, estas intrusiones posiblemente son las que han causado metamorfismo termal y mineralización de sulfuros. En este sector se encuentran varias minas abandonadas. (Cobbing et al., 1996).

6.2.6. Lincuna, C° Sillagash y Mina Boliche

En la región comprendida entre Ticapampa y Mina Huancapeti, se identifican tres cuerpos intrusivos subvolcánicos con características particulares. Estos presentan una textura porfirítica, exhibiendo fenocristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, algunas hornblendas prismáticas y escasas biotitas, todo ello enclavado en una matriz fina afanítica de tonalidad verdosa. Estos cuerpos intrusivos guardan relación con flujos de lavas porfiríticas, aglomerados, brechas y sills, que aparentemente interrumpen o cubren la secuencia piroclástica tobácea conocida como Calipuy Superior. (Cobbing et al., 1996).

6.2.7. Depósitos Cuaternarios

6.2.7.1. Depósitos Aluviales

Las formaciones aluviales presentan notables variaciones en cuanto a tamaño y composición de las fracciones clásticas, factores que están influenciados principalmente por la naturaleza de la roca madre, la pendiente del terreno y la intensidad del agente transportador y acumulador, así como por las características del proceso de meteorización. En términos generales, se observan bloques y fragmentos mayormente angulosos a subangulosos, junto con fracciones de limoarcilla y arena distribuidas de manera irregular en esta área (Cobbing et al., 1996).

6.2.7.2. Depósitos coluviales

Son depósitos que se encuentran adyacentes a los taludes de las formaciones rocosas en las laderas, tiene clastos de tamaño y formas variables que dependen en gran medida de la roca madre. (Cobbing et al., 1996).

6.3. Marco Tectónico – Estructural

6.3.1. Deformación durante el Cretácico y el Paleógeno-Neógeno

Los ejes de plegamiento de las formaciones cretáceas y cenozoicas muestran una tendencia andina en dirección NW-SE. Sin embargo, se observan diversos episodios de plegamiento, y es posible que existan otras fases menos evidentes. Todos estos episodios de plegamiento son coaxiales, lo que dificulta su identificación completa. Este tipo de deformación en este período se clasifica como la orogenia Sub-Herciniana (Cobbing et al., 1996).

Los plegamientos que ocurrieron después de la formación Casapalca y antes del depósito del Calipuy en el Eoceno, posiblemente durante el Paleoceno, se denomina como la orogenia Incaica. La deformación que ocurrió después de la acumulación del Calipuy se conoce como la fase Quechua. Estos periodos de plegamiento son coaxiales, lo que significa que los esfuerzos del

campo que los generaron mantuvieron la misma orientación a lo largo del tiempo, aunque probablemente alternaron entre periodos de compresión y tensión (Cobbing et al., 1996).

6.3.2. Zona de rocas volcánicas del Calipuy con plegamiento suave

Este tipo de pliegues se observan en las rocas del grupo Calipuy, que se superpone a las rocas sedimentarias y volcánicas plegadas del Cretáceo. En estas rocas, es evidente que los ejes de los pliegues coinciden con los de las rocas subyacentes del Cretáceo, lo que indica que las estructuras subyacentes han sido afectadas por las deformaciones más recientes y que los ejes de deformación en los volcánicos han sido determinados por el rejuvenecimiento de los ejes en las rocas cretáceas subyacentes (Cobbing et al., 1996).

6.3.3. Fallas y Fracturas

Como se anticipó líneas arriba los plegamientos son coaxiales, esto sugiere que los cambios en los esfuerzos que dieron lugar a esta deformación fueron esencialmente los mismos. El esfuerzo principal y dominante se orientaba de suroeste a noreste, lo que resultó en la formación de pliegues con una orientación noroeste-sureste, conocida como tendencia andina. Este tipo de esfuerzo es consecuencia del proceso de subducción de la corteza oceánica bajo el continente. Cabe destacar que la compresión no fue continua; se han identificado tres fases de plegamiento, y es evidente que el intervalo entre estos episodios estuvo marcado por un régimen de tensión. Se deduce que, en general, el proceso alternó entre fases de tensión y compresión a lo largo del eje suroeste-noreste, por ello se produjeron los siguientes sistemas de fracturas (Cobbing et al., 1996):

1- Por compresión de N45° a N225°

- Fallas de rumbo con una dirección predominantemente NNE a aproximadamente N20°.
- Fallas de rumbo con una dirección predominantemente sinistral, alrededor de N255°.
- Junturas de tensión con una orientación aproximada de N45° (normal a los Andes)

2- Por tensión de $N45^{\circ}$ - $N225^{\circ}$

- Junturas de tensión con orientación aproximada de $N315^{\circ}$ (Andino).

Por lo tanto, la mayoría de las fallas y fracturas observadas se ajustan al patrón de un par conjugado de cizalla por compresión con orientación de $N45^{\circ}$ a $N225^{\circ}$ y un sistema ortogonal de juntas de tensión a lo largo de las direcciones andinas y normales andinas, generadas por episodios alternos de compresión y tensión a lo largo de ejes persistentes. Los sistemas de fracturas en los plutones del Batolito y en las capas de rocas volcánicas muestran un desarrollo similar, lo que sugiere que posiblemente fueron influenciados por un campo de esfuerzo regional que desempeñó un papel significativo en la formación de las fracturas en los plutones de granito. (Cobbing et al., 1996).

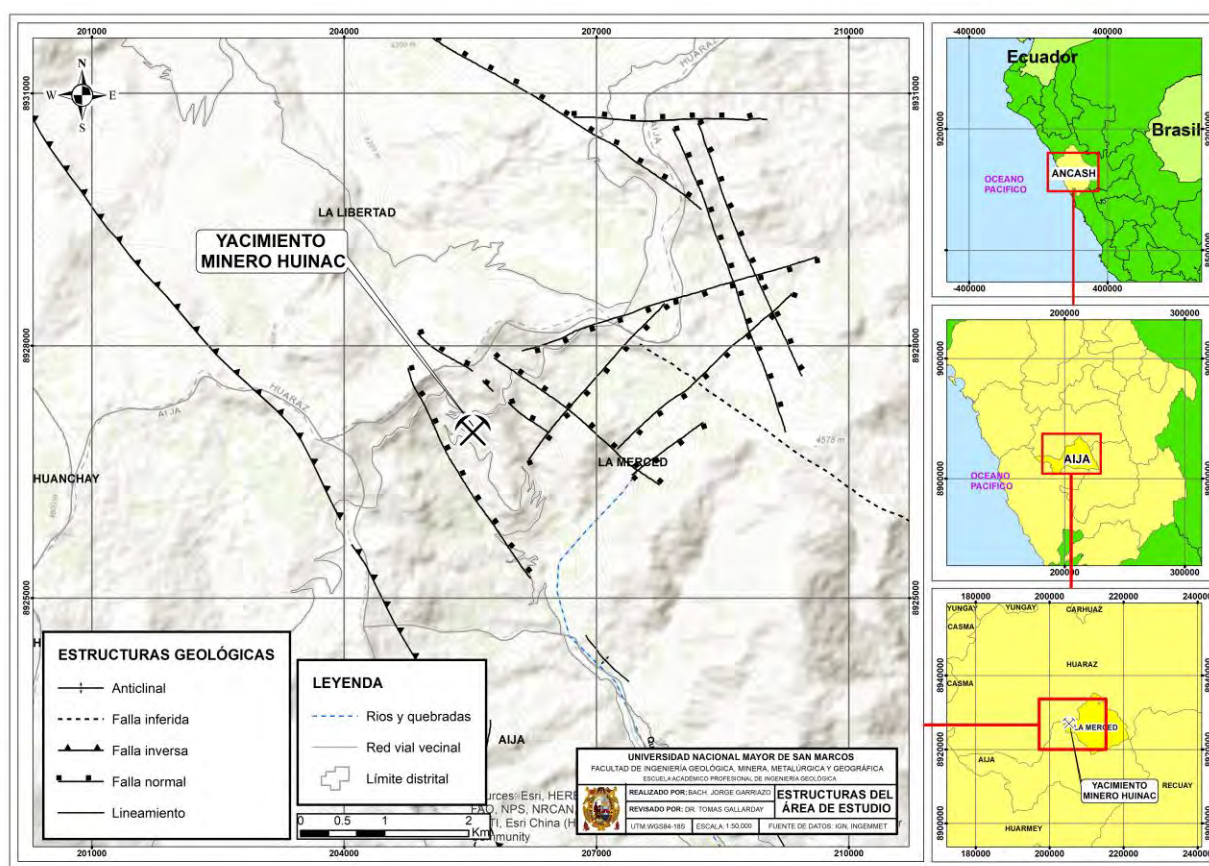


Figura 16. Mapa geológico estructural de la zona de estudio. Presenta las estructuras geológicas del área de estudio. Redibujado por el autor del INGENMET.

7. CAPÍTULO VII. GEOLOGÍA LOCAL

El entorno geológico de la estructura en estudio está caracterizado por presentar rocas sedimentarias, intrusivas y metamórficas, tenemos lutitas con un metamorfismo de bajo grado lo cual da la apariencia en algunas zonas de ser pizarras en un estado inicial; se tiene también intrusiones y/o diques de composición pórfido andesíticas que van desde 2 hasta 10 metros de espesor, se tiene también filitas y pizarras producto de un metamorfismo regional de bajo a medio grado. El marco estructural lo componen tres sistemas de vetas fallas denominados Huinac Norte, Huinac Oeste y Huinac Este, nuestra área de estudio se centra en Huinac Este, se tiene también la presencia de algunos pliegues y fallas de rumbo.

7.1. Estratigrafía

7.1.1. Pizarra con metamorfismo de bajo grado

Caracterizada principalmente por su color verdoso, aunque en algunas zonas se torna un poco más grisáceo, en este tipo de roca es donde se desarrolló la mineralización; está compuesto principalmente por micas (sericita) y minerales arcillosos, seguido de escaso cuarzo. Se observa que las micas están son reemplazadas por arcillas. También se observan minerales accesorios como zircón y rutilo dispersos en las micas. La roca representa textura mosqueada formada por agregados de micas y arcillas, resultado de metamorfismo regional de baja intensidad, el protolito corresponde a una lutita. La muestra exhibe cortes atravesados por vetas de sericita, seguidas por vetas rellenas de cuarzo, sericita, rutilo y otros minerales opacos. Este tipo de litología es la que predomina en las zonas de estudio denominados, Huinac Oeste y Huinac Este (Figura 17).

7.1.2. Pizarras y filitas con metamorfismo de grado medio

Este tipo de roca se presenta en zonas alejadas de las zonas mineralizadas, no se desarrolla mineralización en este tipo de roca, está compuesta por porfidoblastos de cordierita-cloritas-cuarzo

inmerso en una matriz construida por agregados de micas (sericita), mineral arcilloso y cuarzo; con mineral accesorio de rutilo, así mismo se observa minerales opacos diseminados por toda la muestra. La textura presente es porfidoblástica y pizarrosa, presenta exfoliación en una dirección. Localmente algunos profiroblastos presentan sombras de presión producto de la blastesis. Esta pizarra intercala con otras rocas metamórficas como filitas, las cuales no se presentan abundantemente (Fig. 18).



Figura 17. Muestra de una pizarra con metamorfismo de bajo grado.



Figura 18. Muestra de una pizarra con metamorfismo grado medio.

7.1.3. Aglomerados volcánicos

Al norte de la zona de estudio, se observan aglomerados volcánicos compuestos tanto por cuarzo, arenisca y carbonatos, como por fragmentos angulosos de andesita en algunos aglomerados.

7.1.4. Brechas piroclásticas

En la zona norte del área de estudio, se pueden identificar brechas que contienen fragmentos angulosos de lutita negra con presencia de pirita, cuyo tamaño varía desde centímetros hasta varios metros. Estos fragmentos se dispersan en una matriz de arcilla descompuesta. Dentro de esta brecha, se encuentran bloques de roca argilizada en los cuales aún se pueden discernir restos de fenocristales de plagioclasa. Este conjunto se presenta como un flujo piroclástico compuesto por bloques y cenizas, asociado a los domos andesíticos presentes en la región. Las cenizas, alteradas por flujos hidrotermales, experimentan una transformación en arcillas. Debido al tamaño de los

bloques, se ha designado a la roca circundante como brecha piroclástica. En algunos casos, esta brecha exhibe una significativa mineralización de minerales de zinc principalmente (Figura 19).

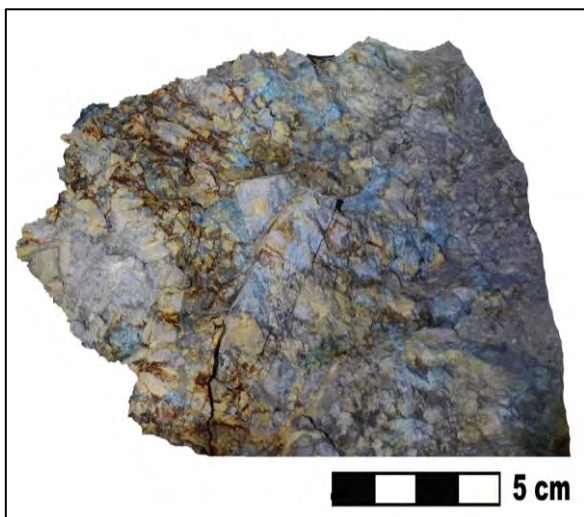


Figura 19. Muestra de una brecha piroclástica.



Figura 20. Muestra de un pórfido andesítico.

7.2. Rocas Plutónicas

7.2.1. Pórfido andesítico

Se presenta como pequeños cuerpos y/o diques que intruyen las pizarras descritas anteriormente. Está compuesto por fenocristales de anfíboles, plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo primario englobado en una matriz completamente reemplazada por agregados de cuarzo, sericita, cloritas y carbonatos. La textura porfirítica nos indica dos etapas de enfriamiento primero lenta y luego una etapa rápida. Ocurre un primer evento de alteración de modo pervasivo donde los anfíboles están reemplazados por muscovita-sericita, carbonatos, rutilo y minerales opacos. Además, donde las plagioclasas y feldespatos potásicos son reemplazados por sericita y carbonatos. Finalmente ocurre una silicificación en modo de vetillas rellenas de cuarzo con minerales opacos.

7.3. Geología estructural

El contexto estructural está representado por fracturas y fallas normales y de rumbo. Se ha identificado tres sistemas de vetas-fallas en la zona de estudio como se observa en la figura 23, tenemos Huinac Norte (N270°), Huinac Oeste (N310) y Huinac Este (N320°). En los sistemas Huinac Oeste y Este se han desarrollado estructuras tensionales entre las vetas principales, a continuación, se detalla los sistemas estructurales:

7.3.1. Sistema Huinac Norte

En el sector norte se encuentran labores trabajadas antiguamente, de estas vetas solo se tiene planos, el acceso no es favorable. Estas estructuras tienen un rumbo E-W y se observa la presencia de algunas estructuras tensionales.

7.3.2. Sistema Huinac Oeste

Este sistema está controlado por las vetas Amapola (N310°/65°NE) y Don Raul (N320°/70°NE), entre ambas estructuras se tiene vetas tensionales tales como veta Esperanza (N270°/75°N), veta Falsa Esperanza (N140°/80°NW) y otras que no han sido de interés en los niveles explotados actualmente debido a sus bajas leyes y espesores. El estilo de mineralización es tipo rosario por ello se tienen anchos de vetas variables, es decir zonas de cierre y apertura que van desde 0.1 hasta 0.5 metros.

7.3.3. Sistema Huinac Este

Este sistema está controlado por las vetas Pierina (N315°/72°NE) y Montecristo (N140°/50°SW), entre ambas estructuras se tiene vetas tensionales tales como veta Caira (N280°/65°N), veta Madrugada (N310°/68°NE), veta Falla Madrugada (N270°/65°N), veta margarita (N305°/70°NE) y otras que no han sido de interés en los niveles explotados actualmente debido a sus bajas leyes y bajos espesores. El estilo de mineralización es tipo rosario por ello se

tienen anchos de vetas variables, es decir zonas de cierre y apertura que van desde 0.1 hasta 1.8 metros.



Figura 21. Estrías de falla y alteración argílica en el contacto entre la veta-falla y la roca caja.



Figura 22. Falla de rumbo sinistral (izquierda) rellenada por carbonatos.

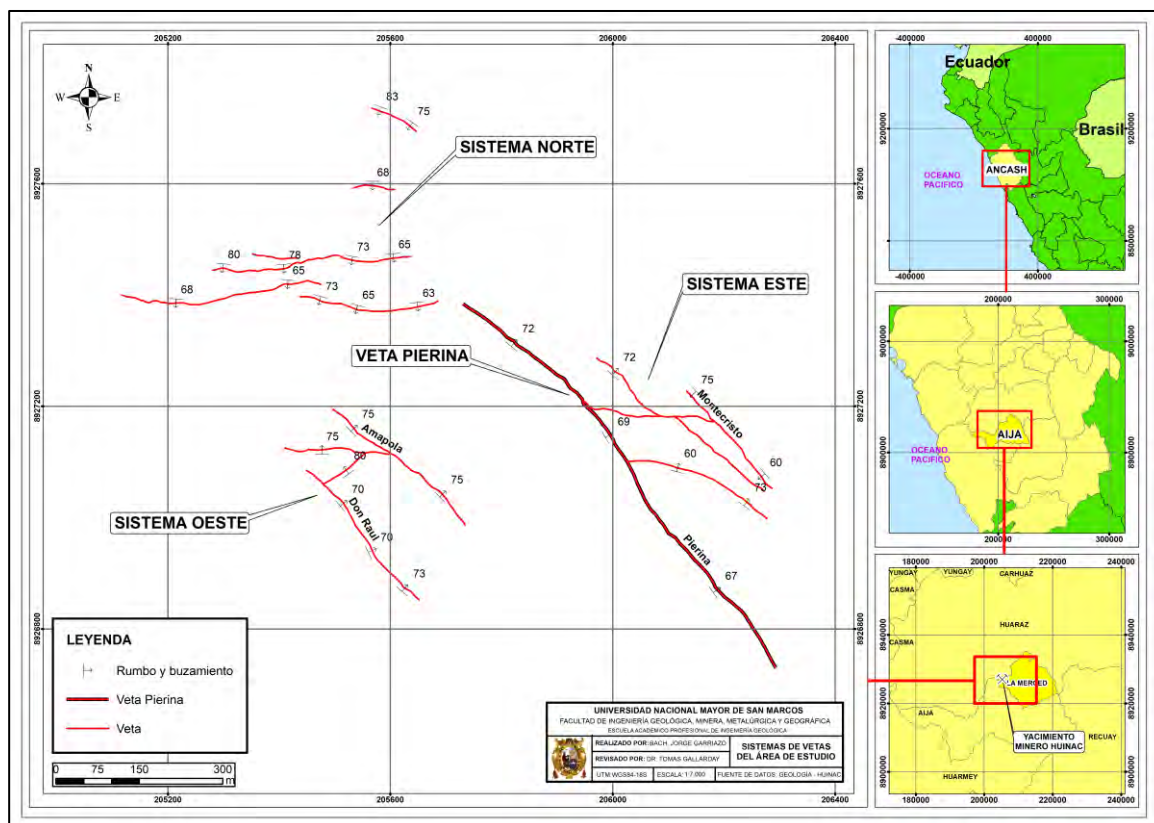


Figura 23. Sistemas de vetas de la zona de estudio. Algunas de ellas afloran en superficie del área de estudio. Elaborado por el autor.

7.3.4. Fallas, fracturas y pliegues

En los sectores Huinac Este y Huinac Oeste se ha identificado algunas fallas normales subverticales como la falla Montecristo (N340°/85° NE), la falla Huinac (N330°/85), la falla Macchay (N35°/85°) y otras fallas de rumbo sinistral (Figura 22) que desplazan centímetros, pero su persistencia llega hasta cientos de metros, estas fallas normalmente están rellenas por carbonatos (calcita y rodocrosita). Se tienen también zonas donde se evidencian plegamientos en las pizarras metamórficas de grado medio, estos plegamientos presentan vetillas de carbonatos.

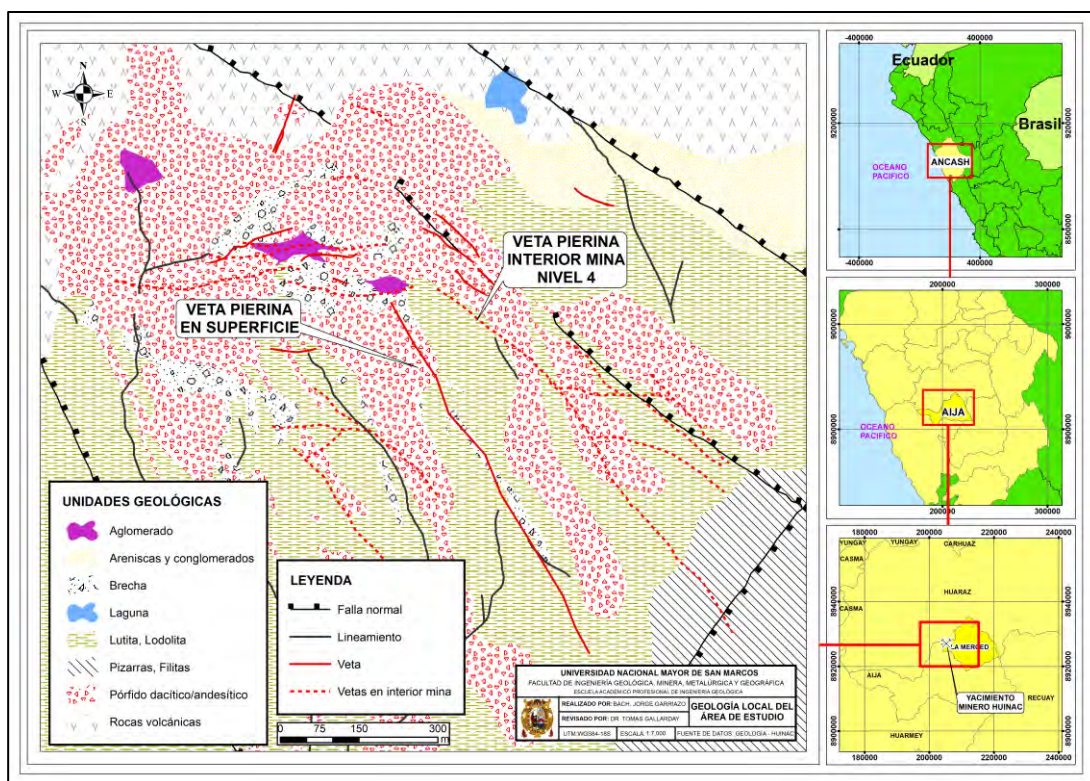


Figura 24. Mapa geológico local de la zona de estudio. Representa las formaciones geológicas y las estructuras presentes en el área de estudio. Elaborado por el autor.

Con los trabajos que antecede he cumplido parte de mi objetivo general y primer objetivo específico (efectuar la geología local que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía de la veta Pierina) y he demostrado parte de mi primera hipótesis específica (es posible estudiar la geología local de la veta Pierina), generando así la primera conclusión de mi tesis.

8. CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS GEOQUÍMICO

La cantidad de muestras analizadas suman un total de 1187 muestras, recolectadas desde 2016 hasta 2022. Los datos se subdividieron en 4 dominios o zonas geoquímicas de acuerdo a las características geológicas y geoquímicas que se presentaron, encontrándose en la zona sur un total de 256 muestras, en la zona Centro un total de 432 muestras, en la zona Norte 1 un total de 297 y en la zona Norte 2 un total de 202 muestras. Cabe señalar también que el análisis se realizó a cuatro elementos: Plata, Cobre, Plomo, Zinc, esto es básicamente debido a que la mayoría de las muestras solo cuenta con el análisis de estos elementos por ser básicamente los de mayor interés económico.

8.1. Análisis Exploratorio de Datos y Prueba de Normalidad

Inicialmente el procesamiento de datos aritméticos de los cuatro dominios mostró que los datos no se ajustan a una distribución normal, esto quedó evidenciado con la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors, la cual nos manifiesta un p valor menor a 0.05 para los cuatro elementos y con esto se rechaza la hipótesis de normalidad.

Para un mejor tratamiento estadístico se procedió a transformar las unidades de medida de los datos de oz/tc y % a ppm, también se transformó los datos aritméticos en datos logarítmicos en base 10, ya que en la mayoría de los casos la abundancia de los metales en la corteza terrestre presenta un mejor contraste estadístico a escala logarítmica, también esto ayuda a que los datos tengan una distribución normal. Con los datos logarítmicos obtenidos se realizó nuevamente el test de Kolmogorov-Smirnov (con la corrección Lilliefors) para contrastar si los cuatro conjuntos de datos se ajustan o no a una distribución normal (Gaussiana). Para describir cada dominio se realizó el análisis exploratorio de datos de cada elemento donde se determinó los estadísticos descriptivos de nuestros datos tales como la media, la mediana, la varianza, desviación estándar, etc. A

continuación, se muestran el análisis para cada elemento de cada zona. Cabe señalar que el procesamiento de datos se hizo mediante el software SPSS versión 26.

8.1.1. Análisis Estadístico de la Zona Sur

En la zona Sur se analizó un total de 256 muestras para los cuatro elementos de un total de 256 muestras, encontrándose ningún dato perdido. El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de esta zona nos muestra a través de los gráficos obtenidos (histograma, gráfico de normalidad y diagrama de cajas) que los cuatro elementos presentes tienen una distribución lognormal (Ver anexo IV). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (Tabla 4), la cual nos muestra un p valor mayor a 0.05 para los cuatro elementos, con esto se acepta la hipótesis de normalidad para los cuatro elementos.

Tabla 3

Resumen del procesamiento de datos de la Zona Sur.

Resumen de procesamiento de casos						
	Válido		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
L10_Ag_ppm	256	100,0%	0	0,0%	256	100,0%
L10_Cu_ppm	256	100,0%	0	0,0%	256	100,0%
L10_Pb_ppm	256	100,0%	0	0,0%	256	100,0%
L10_Zn_ppm	256	100,0%	0	0,0%	256	100,0%

Nota. No existe ningún dato perdido en el análisis efectuado. Data elaborada por el autor.

Tabla 4

Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Sur.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
L10_Ag_ppm	,025	256	,200 [*]	,998	256	,986
L10_Cu_ppm	,050	256	,200 [*]	,989	256	,050
L10_Pb_ppm	,066	256	,010	,943	256	,000
L10_Zn_ppm	,067	256	,007	,981	256	,002

^{*}. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
^a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota. Los cuatro elementos pasan la prueba de normalidad. Data elaborada por el autor.

8.1.2. Análisis Estadístico de la Zona Centro

En la zona Centro se analizó un total de 440 muestras para los cuatro elementos de un total de 448, encontrándose 8 muestras perdidas debido a que estas muestras no contaban con los datos geoquímicos completos (Ag, Cu, Pb, Zn). El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de esta zona nos muestra a través de los gráficos obtenidos (histograma, gráfico de normalidad y diagrama de cajas) que los cuatro elementos presentes tienen una distribución lognormal (Ver anexo IV). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (Tabla 6), la cual nos muestra un p valor mayor a 0.05 para la Plata, Cobre, Plomo, Zinc y con esto se acepta la hipótesis de normalidad para los cuatro elementos.

Tabla 5

Resumen del procesamiento de datos de la Zona Centro.

Resumen de procesamiento de casos						
	Válido		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
L10_Ag_ppm	440	98,2%	8	1,8%	448	100,0%
L10_Cu_ppm	440	98,2%	8	1,8%	448	100,0%
L10_Pb_ppm	440	98,2%	8	1,8%	448	100,0%
L10_Zn_ppm	440	98,2%	8	1,8%	448	100,0%

Nota. Existen 8 casos perdidos. Data elaborada por el autor.

Tabla 6

Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Centro.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
L10_Ag_ppm	,051	440	,007	,988	440	,001
L10_Cu_ppm	,033	440	,200*	,995	440	,171
L10_Pb_ppm	,024	440	,200*	,993	440	,044
L10_Zn_ppm	,051	440	,008	,987	440	,001
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota. Los cuatro elementos pasan la prueba de normalidad. Data elaborada por el autor.

8.1.3. Análisis Estadístico de la Zona Norte 1

En la zona Norte 1 se analizó un total de 297 muestras para los cuatro elementos de un total de 297, encontrándose ningún dato perdido. El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de esta zona nos muestra a través de los gráficos obtenidos (histograma, gráfico de normalidad y diagrama de cajas) que los cuatro elementos presentes tienen una distribución lognormal (Ver anexo IV). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (tabla 8), la cual nos muestra un p valor mayor a 0.05 para la Plata, Cobre, Plomo, Zinc y con esto se acepta la hipótesis de normalidad para los cuatro elementos.

Tabla 7

Resumen del procesamiento de datos de la Zona Norte 1.

Resumen de procesamiento de casos						
	Válido		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
L10_Ag_ppm	297	100,0%	0	0,0%	297	100,0%
L10_Cu_ppm	297	100,0%	0	0,0%	297	100,0%
L10_Pb_ppm	297	100,0%	0	0,0%	297	100,0%
L10_Zn_ppm	297	100,0%	0	0,0%	297	100,0%

Nota. No existen casos perdidos. Data elaborada por el autor.

Tabla 8

Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Norte 1.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
L10_Ag_ppm	,035	297	,200 [*]	,993	297	,143
L10_Cu_ppm	,046	297	,200 [*]	,984	297	,002
L10_Pb_ppm	,047	297	,200 [*]	,990	297	,041
L10_Zn_ppm	,060	297	,011	,972	297	,000
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota. Los cuatro elementos pasan la prueba de normalidad. Data elaborada por el autor.

8.1.4. Análisis Estadístico de la Zona Norte 2

En la zona Norte 2 se analizó un total de 202 muestras para los cuatro elementos de un total de 202, encontrándose ningún dato perdido. El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de esta zona nos muestra a través de los gráficos obtenidos (histograma, gráfico de normalidad y diagrama de cajas) que los cuatro elementos presentes tienen una distribución lognormal (Ver anexo IV). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (tabla 10), la cual nos muestra un p valor mayor a 0.05 para la Plata, Cobre, Plomo, Zinc y con esto se acepta la hipótesis de normalidad para los cuatro elementos.

Tabla 9

Resumen del procesamiento de datos de la Zona Norte 2.

Resumen de procesamiento de casos						
	Válido		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
L10_Ag_ppm	202	100,0%	0	0,0%	202	100,0%
L10_Cu_ppm	202	100,0%	0	0,0%	202	100,0%
L10_Pb_ppm	202	100,0%	0	0,0%	202	100,0%
L10_Zn_ppm	202	100,0%	0	0,0%	202	100,0%

Nota. No existen casos perdidos. Data elaborada por el autor.

Tabla 10

Prueba de normalidad para cada elemento de la Zona Norte 2.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
L10_Ag_ppm	,071	202	,015	,959	202	,000
L10_Cu_ppm	,064	202	,042	,980	202	,006
L10_Pb_ppm	,036	202	,200*	,991	202	,250
L10_Zn_ppm	,059	202	,089	,972	202	,000
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors.						

Nota. Los cuatro elementos pasan la prueba de normalidad. Data elaborada por el autor.

8.2. Correlación Bivariada

Con el objetivo de determinar el grado de las asociaciones estadísticas entre los cuatro elementos se procedió a calcular los coeficientes de correlación de Pearson. Para este análisis se usaron los datos logarítmicos ya que para este tipo de correlación se necesita que los datos introducidos tengan una distribución normal o gaussiana.

El procesamiento de datos para la realización de la correlación de Pearson se hizo usando el software SPSS versión 26. Se ha clasificado en correlaciones “fuertes” a los valores superiores o iguales a 0.5, “medios” para aquellos entre 0.3 y 0.5, “débiles” para aquellos entre 0.3 y 0.1 y “nulas” para aquellos menores a 0.1 (Hernández et al., 2018) tal como se muestra en la tabla 11. El análisis se realizó para cada zona de estudio (Sur, Centro, Norte 1, Norte 2).

En el análisis de las correlaciones de todas las zonas se determinó que las correlaciones entre Plata-Cobre y Plomo-Zinc tienen tendencia a incrementarse en sentido de Sur a Norte; por el contrario, las correlaciones entre Plata-Plomo, Plata-Zinc, Cobre-Zinc tienen tendencia a disminuir en el mismo sentido de Sur a Norte, el resto de correlaciones no presentan muchas variaciones.

Tabla 11

Rango de valores para los niveles de correlación.

Correlación Fuerte	$0.50 \leq r \leq 1.00$
Correlación Media	$0.30 \leq r \leq 0.50$
Correlación Débil	$0.10 \leq r \leq 0.30$
Correlación Nula	$0.00 \leq r \leq 0.10$

Nota. Se muestra los niveles de correlación con sus respectivos colores. Tomado de “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones” por J. Hernández et al., 2018.

8.2.1. Análisis correlacional bivariado de la Zona Sur

En la matriz de correlación de Pearson de la zona Sur (Tabla 12) nos muestra una correlación fuerte entre Plata y Cobre, correlación media para Plata-Plomo, Plata-Zinc, Cobre-Zinc y débil para Cobre-Plata y Plomo-Zinc. No se encontró correlaciones nulas en esta zona.

Tabla 12

Matriz de correlación de Pearson de la zona Sur.

	L10_Ag	L10_Cu	L10_Pb	L10_Zn
L10_Ag	1.00	0.74	0.49	0.33
L10_Cu	0.74	1.00	0.16	0.41
L10_Pb	0.49	0.16	1.00	0.22
L10_Zn	0.33	0.41	0.22	1.00

Nota. Para un mejor tratamiento se realizó las correlaciones a escala logarítmica. Tabla elaborada por el autor.

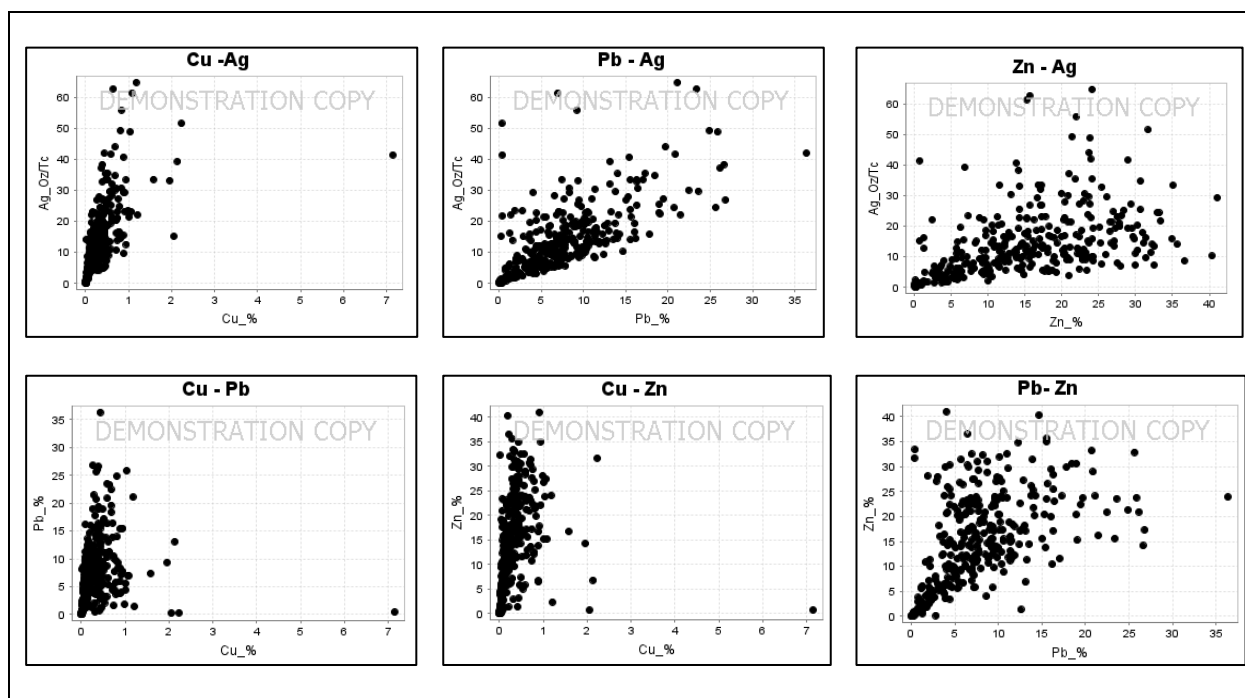


Figura 25. Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Sur. Elaborado por el autor.

8.2.2. Análisis correlacional bivariado de la Zona Centro

En la matriz de correlación de Pearson de la zona Centro nos muestra una correlación fuerte entre Plata-Cobre, Plata-Plomo, correlación media para Cobre-Plomo, Plomo-Zinc y débil para Plata-Zinc y Cobre-Zinc. No se encontró correlaciones nulas en esta zona. Cabe señalar que en comparación con la zona Sur es notorio que las correlaciones entre Plata-Cobre, Plata-Plomo, Plomo-Zinc, Cobre-Plomo incrementaron su valor notoriamente subiendo de nivel; por el contrario, las correlaciones entre Plata-Zinc y Cobre-Zinc disminuyeron su valor bajando de nivel.

Tabla 13

Matriz de correlación de Pearson de la zona Centro.

	L10_Ag	L10_Cu	L10_Pb	L10_Zn
L10_Ag	1.00	0.86	0.56	0.29
L10_Cu	0.86	1.00	0.33	0.11
L10_Pb	0.56	0.33	1.00	0.30
L10_Zn	0.29	0.11	0.30	1.00

Nota. Para un mejor tratamiento se realizó las correlaciones a escala logarítmica.

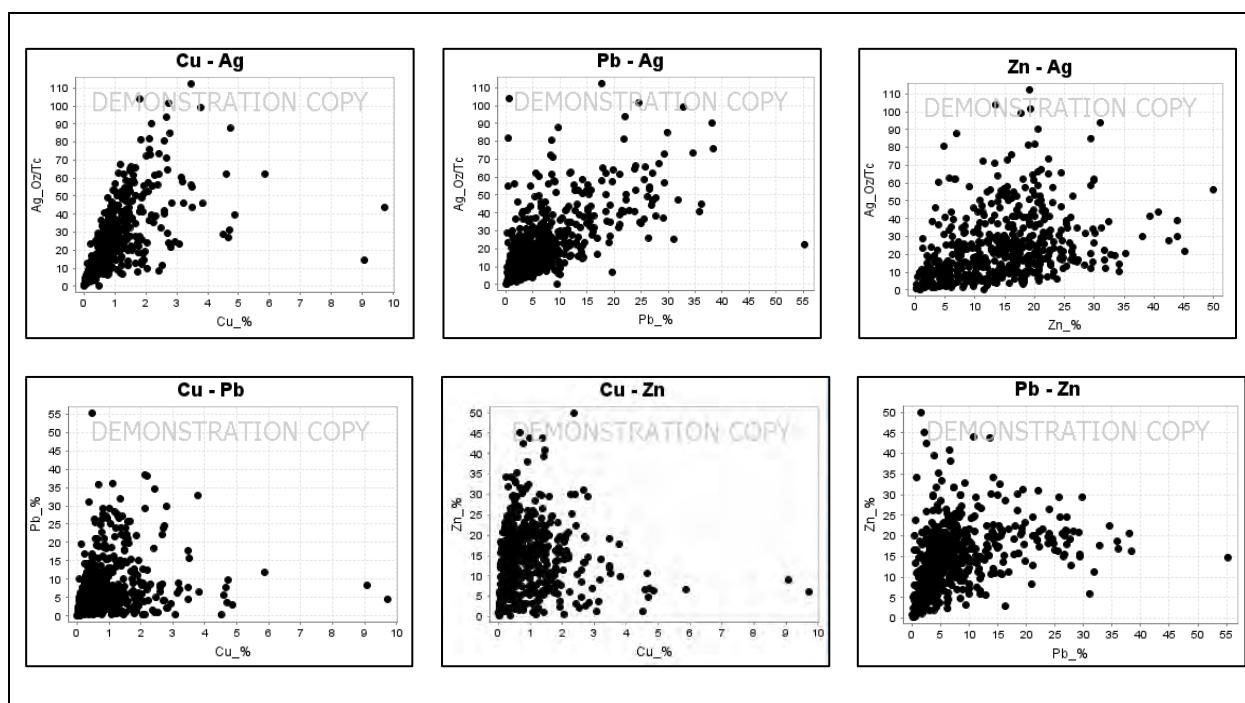


Figura 26. Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Centro. Elaborado por el autor.

8.2.3. Análisis correlacional bivariado de la Zona Norte 1

En la matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 1 nos muestra una correlación fuerte entre Plata-Cobre, correlación media para Plata-Plomo, Plomo-Zinc, débil para Plata-Zinc y Cobre-Zinc y nula para Cobre-Zinc. Cabe señalar que en comparación con la zona Centro es notorio que las correlaciones entre Plomo-Zinc, incrementaron su valor notoriamente subiendo de nivel; por el contrario, las correlaciones entre Cobre-Plomo y Plata-Zinc disminuyeron su valor bajando de nivel. Las demás correlaciones han tenido pocas variaciones.

Tabla 14

Matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 1.

	L10_Ag	L10_Cu	L10_Pb	L10_Zn
L10_Ag	1.00	0.86	0.43	0.23
L10_Cu	0.86	1.00	0.13	0.09
L10_Pb	0.43	0.13	1.00	0.48
L10_Zn	0.23	0.09	0.48	1.00

Nota. Para un mejor tratamiento se realizó las correlaciones a escala logarítmica.

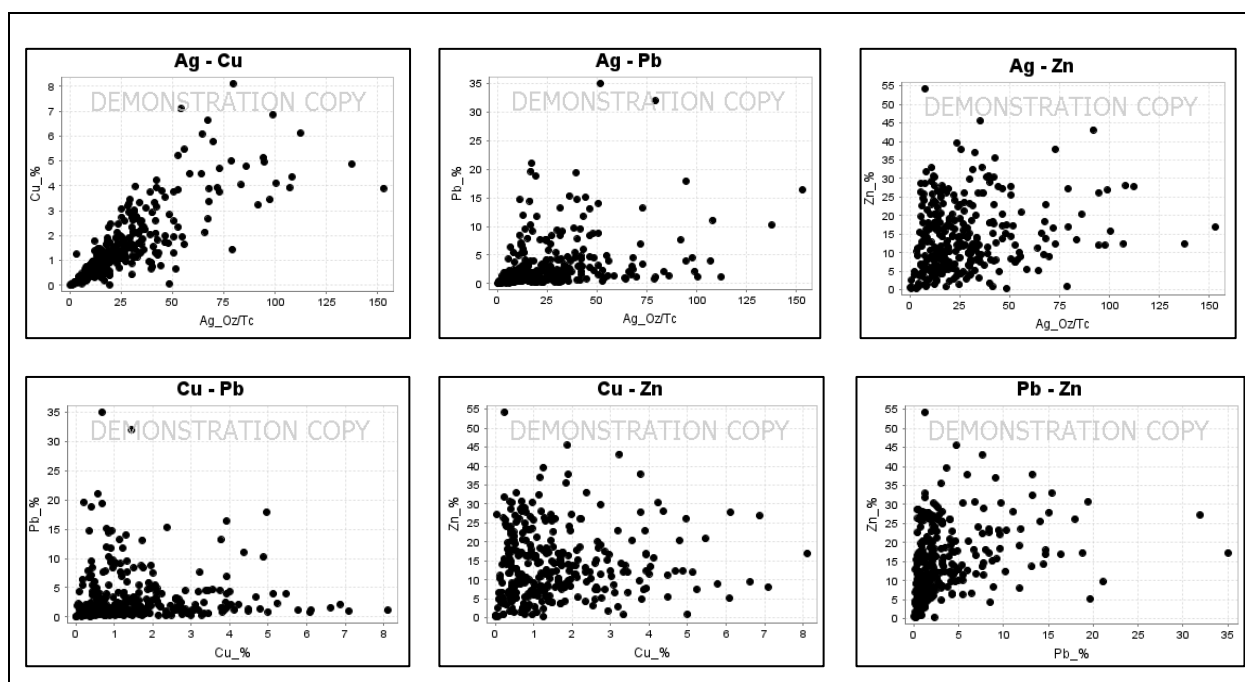


Figura 27. Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Norte 1. Elaborado por el autor.

8.2.4. Análisis correlacional bivariado de la Zona Norte 2

En la matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 2 nos muestra una correlación fuerte entre Plata-Cobre, Plomo-Zinc, correlación media para Plata-Plomo, Plata-Zinc, débil para Cobre-Plomo, Cobre-Zinc. Cabe señalar que en comparación con la zona Norte 1 es notorio que las correlaciones entre los elementos Plata-Cobre, Plomo-Zinc, Cobre-Zinc incrementaron su valor notoriamente subiendo de nivel; por el contrario, las correlaciones entre los elementos Plata-Plomo y Plata-Zinc disminuyeron su valor bajando de nivel. Las demás correlaciones varían muy poco.

Tabla 15

Matriz de correlación de Pearson de la zona Norte 2.

	L10_Ag	L10_Cu	L10_Pb	L10_Zn
L10_Ag	1.00	0.90	0.34	0.38
L10_Cu	0.90	1.00	0.13	0.16
L10_Pb	0.34	0.13	1.00	0.67
L10_Zn	0.38	0.16	0.67	1.00

Nota. Para un mejor tratamiento se realizó las correlaciones a escala logarítmica.

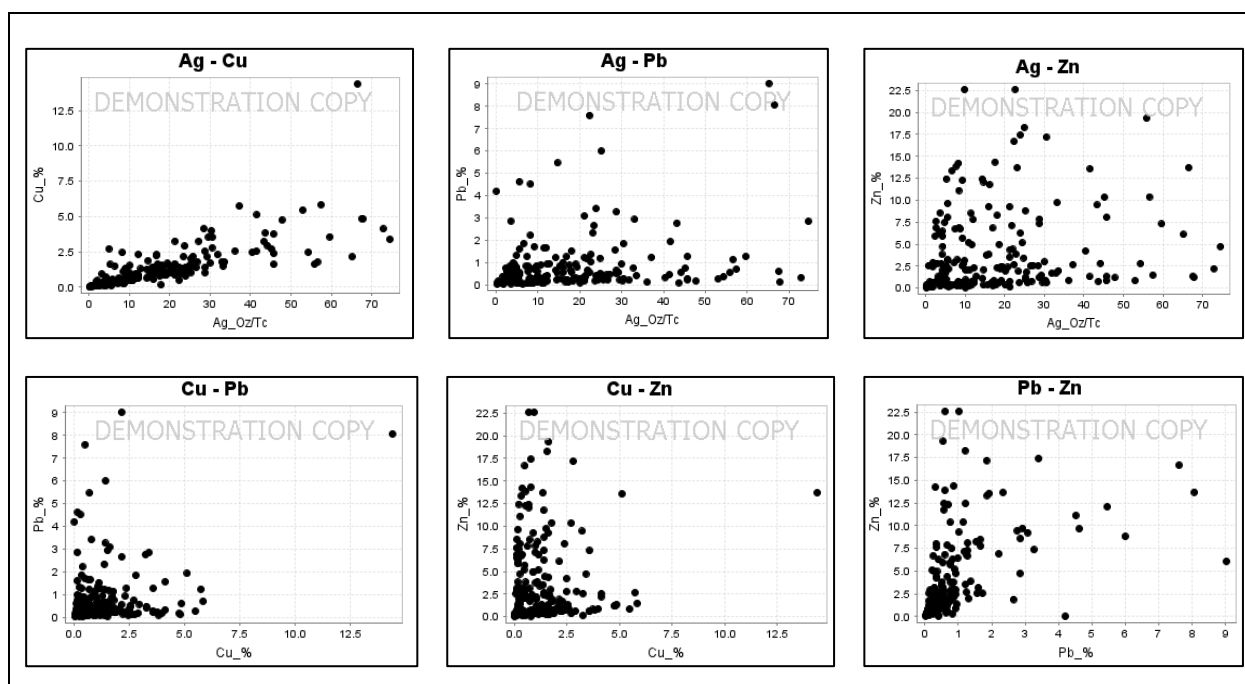


Figura 28. Diagrama de correlación-dispersión de los cuatro elementos (Ag, Cu, Pb, Zn) en la zona Norte 2. Elaborado por el autor.

8.3. Planos geoquímicos

Se realizó el ploteo de datos por cada elemento para visualizar su distribución y abundancia a lo largo de la veta Pierina en sus distintos niveles reconocidos en la mina; cabe recalcar que los rangos de abundancia mostrados en los planos geoquímicos que se presentan a continuación, son parámetros calculados y establecidos por el área de geología de la mina. El análisis indica que en el caso de la plata su abundancia se incrementa en el centro y decrece hacia la parte sur y norte; en el caso del cobre su abundancia se incrementa hacia el norte y decrece desde el centro hacia la parte sur; por otro lado, el plomo incrementa su abundancia desde el centro hacia el sur, en el norte su presencia es escasa; mientras que el zinc se presenta moderadamente en la zona norte e incrementa su abundancia hacia el sur.

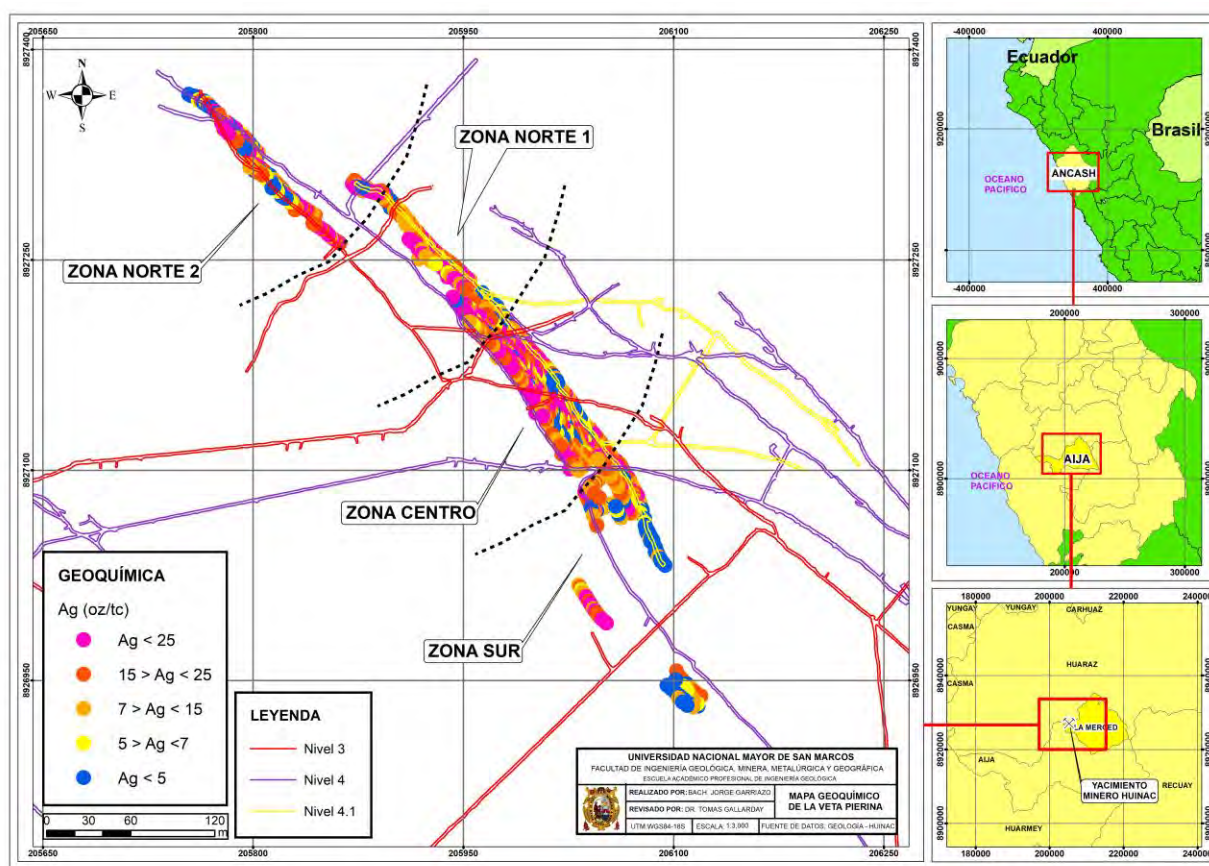


Figura 29. Mapa geoquímico de la veta Pierina en los distintos niveles de la mina, se muestra los cuatro dominios o zonas geoquímicas establecidas. Elaborado por el autor.

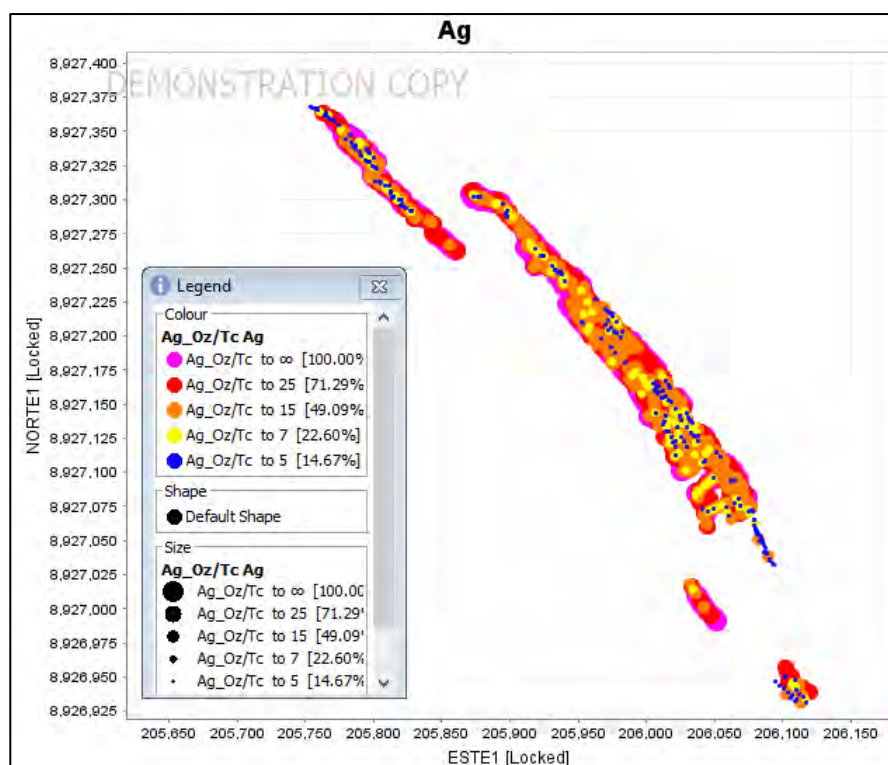


Figura 30. Comportamiento geoquímico de la plata (Ag) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor.

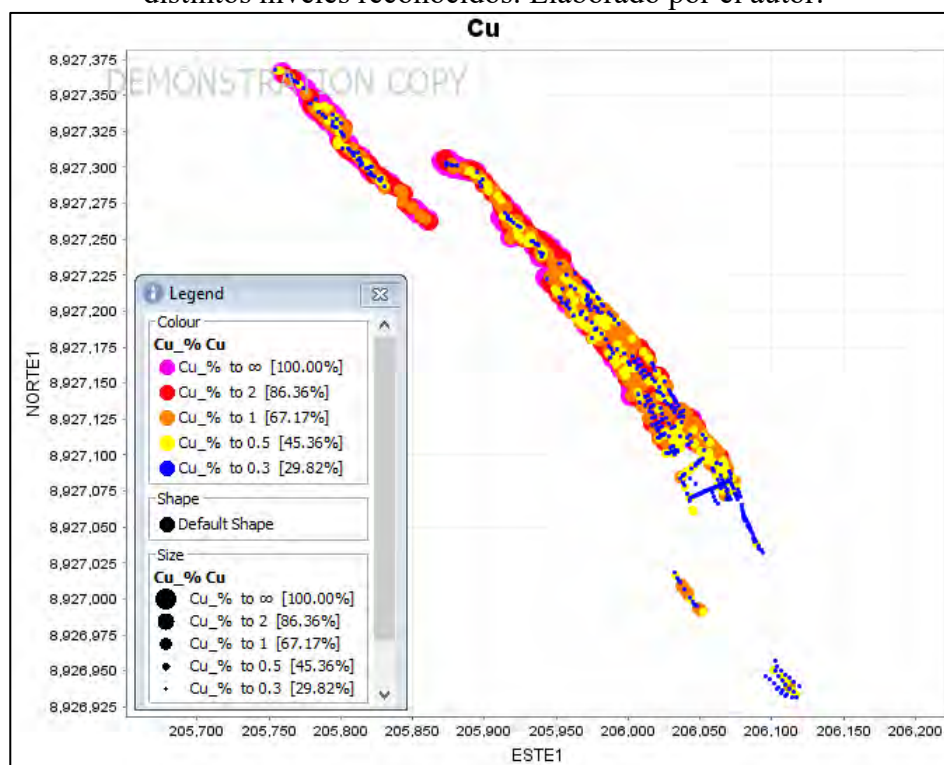


Figura 31. Comportamiento geoquímico del cobre (Cu) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor.

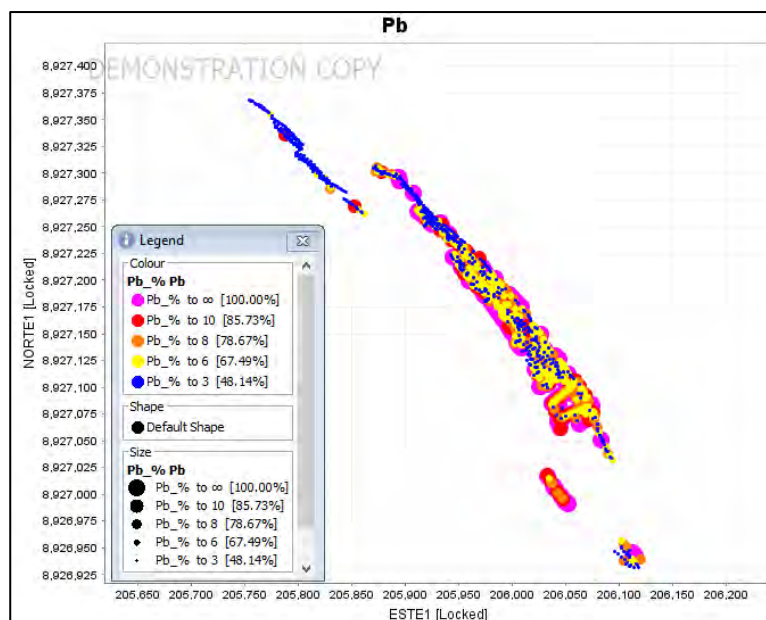


Figura 32. Comportamiento geoquímico del plomo (Pb) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor.

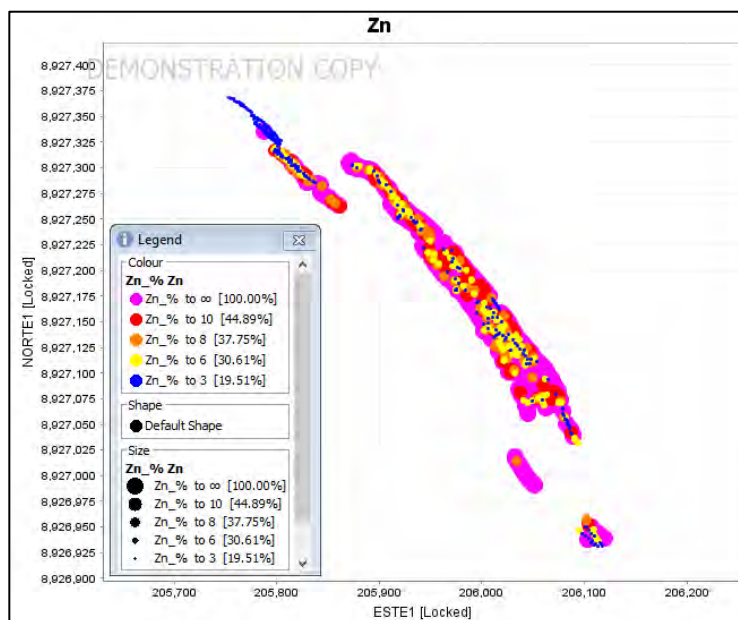


Figura 33. Comportamiento geoquímico del zinc (Zn) a lo largo de la veta Pierina en los distintos niveles reconocidos. Elaborado por el autor.

Con los trabajos que antecede refuerzo parte de mi objetivo general y primer objetivo específico (efectuar la geología local que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía de la veta Pierina) y he demostrado en parte mi primera hipótesis específica (es posible estudiar la geología local de la veta Pierina, generando así la segunda conclusión de mi tesis.

9. CAPÍTULO IX.

ANÁLISIS MINERALÓGICO, ALTERACIONES Y BRECHAS

Para determinar las características mineralógicas, de las alteraciones y las brechas presentes de la estructura en estudio, se realizó la caracterización macroscópica y microscópica; la primera consistió en describir detalladamente las muestras de mano extraídas de las zonas de estudio (Zona Sur, Zona Centro, Zona Norte 1), así como las características de la veta in situ. En cuanto al análisis microscópico se realizaron análisis de muestras pulidas y secciones delgadas de las zonas de estudio Norte 1 y Norte 2.

9.1. Análisis Macroscópico

9.1.1. Análisis Macroscópico de la Zona Sur

En la zona Sur, la veta se caracteriza por presentar mineralización de sulfuros de plomo, zinc y Hierro, resalta también la presencia de carbonatos. La galena argentífera se presenta cristalizada y raramente masiva, los cristales son cúbicos menores a 0.8 cm, se observa también clivaje en tres direcciones; la esfalerita se presenta en dos variedades (blenda rubia y marmatita) se observan de forma masiva y en cristales tetraédricos (con algunas caras truncadas) menores a 0.5 cm con clivaje en tres direcciones, en cuanto a la pirita, esta se presenta masiva y en granos finos menores a 1 mm; se tiene también la presencia de calcita y rodocrosita mayormente en cristales trigonales escalenoédricos y romboédricos de 1 a 2 cm y en algunos casos formando rosetas y pequeñas geodas, se presentan también de forma masiva, se observa también venillas de calcita; tenemos también la presencia de venillas de Cuarzo y ligera presencia de oropimente y rejalgar. En cuanto a las texturas, tenemos la predominancia de texturas bandeadas formadas principalmente por bandas de galena, esfalerita, pirita y carbonatos, la potencia de las bandas de galena y esfalerita en algunos casos son el doble que las bandas de pirita; se observa también texturas botroidales en los carbonatos y también texturas coloformes formadas por carbonatos e intercalaciones con la

esfalerita (principalmente marmatita). Las zonas de apertura de la veta en este sector llegan hasta 50 cm y las zonas de cierre hasta 2 cm.

La alteración presente en esta zona es del tipo argílica intermedia, producida en el contacto entre la veta y la roca encajonante (mayormente en el plano de falla), se tiene mayor presencia de arcillas como caolinita y montmorillonita, el halo de alteración llega a medir desde milímetros hasta 10 cm aproximadamente, la roca caja se ve poco afectada por la presencia de este tipo de alteración; se tiene también la presencia de alteración propilítica y carbonatación.

Se tiene la presencia de brechas freáticas, tienen un aspecto vetiforme que acompaña a la veta en algunos sectores, la brecha mide desde 5 cm hasta 25 cm. La brecha se caracteriza por ser clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados y miden desde pocos milímetros hasta 5 cm, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, aunque también contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena; la matriz generalmente está constituida por granos finos de composición máfica.



Figura 34. Veta de 30 cm, muestra bandas de galena, esfalerita, pirita y carbonatos. Se presenta alteración argílica, el halo de alteración de la veta llega a medir hasta 10 cm.



Figura 35. Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y las bandas claras por calcita.



Figura 36. Muestra extraída para análisis, se observa bandeamiento de sulfuros (esfalerita, galena y pirita).

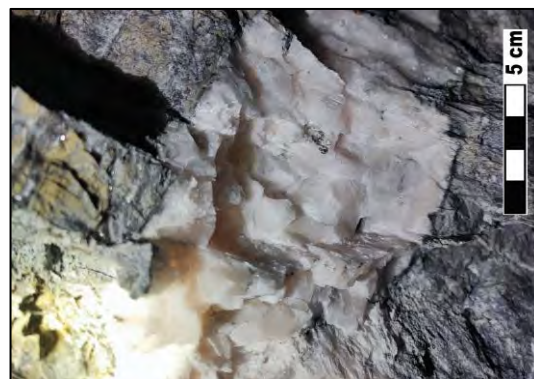


Figura 37. Vetilla de cristales romboédricos de calcita y rodocrosita, los cuales llegan a medir hasta dos centímetros, la mayoría de cristales tienen las caras incompletas.

9.1.2. Análisis Macroscópico de la Zona Centro

En la zona Centro, la veta se caracteriza por presentar mineralización de sulfuros de plomo, zinc y Hierro, resalta también la presencia de carbonatos.

La galena argentífera se presenta cristalizada y muy raramente masiva, los cristales son cúbicos de 0.1 cm a 2 cm, se observa también clivaje en tres direcciones; la esfalerita se presenta en dos variedades (blenda rubia y marmatita) se observan de forma masiva y en cristales tetraédricos (con algunas caras truncadas) menores a 1 cm con clivaje en tres direcciones, en cuanto a la pirita, esta se presenta masiva, en cristales cúbicos y dodecaédricos que van de 0.1 a 0.7 cm, también en granos finos menores a 1 mm; se tiene también la presencia de calcita y rodocrosita mayormente en cristales trigonales escalenoédricos y romboédricos de 1 a 2 cm y de forma masiva, en algunos casos los carbonatos forman geodas, se observa también venillas de calcita; tenemos también la presencia de cuarzo en cristales prismáticos de hasta 0.5 cm, en granos y en venillas.

En cuanto a las texturas, tenemos la predominancia de texturas bandeadas formadas principalmente por bandas de galena, esfalerita, pirita y carbonatos, la potencia de las bandas de galena y esfalerita en algunos casos son el doble o igual que las bandas de pirita; se observa también texturas crustiformes formadas por carbonatos y disseminaciones de sulfuros, mayormente

esfalerita; se tiene texturas botroidales en los carbonatos y también texturas coloformes formadas por carbonatos e intercalaciones con la esfalerita (principalmente marmatita). Las zonas de apertura de la veta en este sector llegan hasta 1.2 m y las zonas de cierre hasta 0.2 m.

La alteración presente en esta zona es del tipo argílica, pero en un estado insipiente producida en el contacto entre la veta y la roca encajonante (mayormente en el plano de falla), se tiene mayor presencia de arcillas como caolinita y montmorillonita, el halo de alteración llega a medir desde milímetros hasta 20 cm aproximadamente, la roca caja se ve poco afectada por la presencia de este tipo de alteración. se tiene también la presencia de alteración propilítica y carbonatación.

Se tiene la presencia de brechas freáticas, tienen un aspecto vetiforme que acompaña a la veta en algunos sectores, la brecha mide desde 5 cm hasta 70 cm. La brecha se caracteriza por ser clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados y miden desde pocos milímetros hasta 5 cm, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, aunque también contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena; la matriz generalmente está constituida por granos finos de composición máfica.



Figura 38. Veta de 60 cm, muestra bandas de sulfuros y carbonatos. Se presenta alteración argílica intermedia.

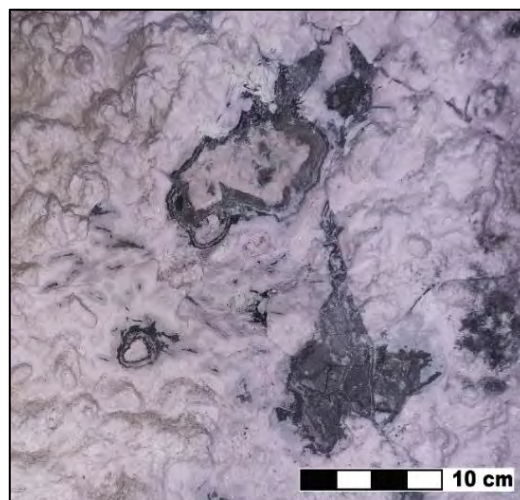


Figura 39. Texturas coloformes, crustiformes formadas por bandas concéntricas, las cuales alternan entre calcita y marmatita.



Figura 40. Brecha clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena.



Figura 41. Muestra extraída para análisis, se observa bandeamiento de sulfuros (esfalerita, galena y pirita), también se tiene texturas crustiformes en la parte izquierda de la muestra formadas entre cristales de galena y carbonatos.

9.1.3. Análisis Macroscópico de la Zona Norte 1

En la zona Norte 1, la veta se caracteriza por presentar mineralización de sulfuros de hierro, zinc, plomo y cobre; se observa la presencia de sulfosales de cobre; resalta también la presencia de carbonatos.

La galena argentífera se presenta cristalizada y raramente masiva, los cristales son cúbicos menores a 0.7 cm, se observa también clivaje en tres direcciones; la esfalerita se presenta en dos variedades (blenda rubia y marmatita) se observan de forma masiva y en cristales tetraédricos (con algunas caras truncadas) menores a 0.5 cm con clivaje en tres direcciones, en cuanto a la pirita, esta se presenta mayormente en granos finos y masiva, se observa también en cristales cúbicos y dodecaédricos menores a 0.5 cm; la calcopirita se presenta masiva y en cristales finos. Los sulfosales de cobre presentes mayormente son tennantita y escasa tetraedrita, se presentan de forma

masiva, granos finos y raras veces en cristales dodecaédricos menores a 0.3 cm, los sulfosales se encuentran diseminadas mayormente en las bandas de pirita. Se tiene también la presencia de calcita y rodocrosita mayormente en cristales trigonales escalenoédricos y romboédricos de 0.5 a 1 cm y de forma masiva, en algunos casos los carbonatos forman geodas, se observa también venillas de calcita; tenemos también la presencia de venillas de Cuarzo.

En cuanto a las texturas, tenemos la predominancia de texturas bandeadas formadas principalmente por bandas de pirita, esfalerita y galena, en este sector las bandas de pirita tienen una potencia tres a cuatro veces mayor que las bandas de esfalerita y galena, se observa también texturas crustiformes, coloformes y botroidales formadas por carbonatos y diseminaciones de sulfuros, las cuales no se encuentran muy desarrolladas en este sector. Las zonas de apertura de la veta en este sector llegan hasta 2.2 m y las zonas de cierre hasta 0.3 m.

La alteración presente en esta zona es del tipo argílica, pero en un estado insipiente producida en el contacto entre la veta y la roca encajonante (mayormente en el plano de falla), se tiene mayor presencia de arcillas como caolinita y montmorillonita, el halo de alteración llega a medir desde milímetros hasta 15 cm aproximadamente, la roca caja se ve poco afectada por la presencia de este tipo de alteración. se tiene también la presencia de alteración sericítica y silicificación.

Se tiene la presencia de brechas freáticas, tienen un aspecto vetiforme que acompaña a la veta en algunos sectores, la brecha mide desde 5 cm hasta 50 cm. La brecha se caracteriza por ser clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados y miden desde pocos milímetros hasta 5 cm, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, aunque también contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena; la matriz generalmente está constituida por granos finos de composición máfica.



Figura 42. Veta con bandas de esfalerita y galena en los bordes mientras que la banda de pirita se presenta al medio.



Figura 43. Vetillas de carbonatos cortando transversalmente a la veta principal, a su vez estas vetillas actúan con falla sinistral.



Figura 44. Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y las bandas claras por calcita. También se puede observar geodas.



Figura 45. Muestra extraída para análisis, se observa banda de galena y esfalerita a la izquierda mientras que a la derecha la banda de pirita, la cual contiene también sulfosales.

9.1.4. Análisis Macroscópico de la Zona Norte 2

En la zona Norte 2, la veta se caracteriza por presentar mineralización de sulfuros de hierro, zinc, plomo y cobre; se observa la presencia de sulfosales de cobre y plata; resalta también la presencia de carbonatos.

La galena argentífera se presenta cristalizada y raramente masiva, los cristales son cúbicos menores a 0.7 cm, se observa también clivaje en tres direcciones; la esfalerita se presenta en dos variedades (blenda rubia y marmatita) se observan de forma masiva y en cristales tetraédricos (con algunas caras truncadas) menores a 0.5 cm con clivaje en tres direcciones, en cuanto a la pirita, esta se presenta mayormente en granos finos y masiva, se observa también en cristales cúbicos y dodecaédricos menores a 0.6 cm; la calcopirita se presenta masiva y en cristales finos; las sulfosales se encuentran diseminadas mayormente en las bandas de pirita, se tiene sulfosales de cobre, mayormente son tennantita y escasa tetraedrita, se presentan de forma masiva, granos finos y raras veces en cristales dodecaédricos menores a 0.3 cm; en cuanto a las sulfosales de plata se presentan escasamente en cristales finos, macroscópicamente no se pudo determinar los minerales presentes. Se tiene también la presencia de calcita y rodocrosita mayormente en cristales trigonales escalenoédricos y romboédricos de 0.5 a 1 cm y de forma masiva, en algunos casos los carbonatos forman geodas, se observa también venillas de calcita y la presencia de venillas de Cuarzo.

En cuanto a las texturas, tenemos la predominancia de texturas bandeadas formadas principalmente por bandas de pirita, esfalerita y galena, en este sector las bandas de pirita tienen una potencia tres a cuatro veces mayor que las bandas de esfalerita y galena, se observa también texturas crustiformes, coloformes y botroidales formadas por carbonatos y diseminaciones de sulfuros, las cuales no se encuentran muy desarrolladas en este sector. Las zonas de apertura de la veta en este sector llegan hasta 1.2 m y las zonas de cierre hasta 0.05 m.

La alteración presente en esta zona es del tipo argílica intermedia, producida en el contacto entre la veta y la roca caja (mayormente en el plano de falla), se tiene mayor presencia de arcillas como caolinita y montmorillonita, el halo de alteración llega a medir desde milímetros hasta 15 cm aproximadamente, la roca caja se ve poco afectada por la presencia de este tipo de alteración.

Se presenta pirita en granos de 0.2 a 1 cm en la zona de alteración; se tiene también la presencia de alteración sericítica y silicificación. Se observan brechas freáticas, tienen un aspecto vetiforme que acompaña a la veta en algunos sectores, la brecha mide desde 5 cm hasta 30 cm. La brecha se caracteriza por ser clasto-soportada polimíctica, los clastos van de subangulosos a subredondeados y miden desde pocos milímetros hasta 5 cm, la composición de los clastos generalmente son margas y granitos, aunque también contiene algunos sulfuros en mínimas cantidades como pirita y galena; la matriz generalmente está constituida por granos finos de composición máfica.



Figura 46. Veta con bandas de esfalerita y galena en los bordes mientras que la banda de pirita se presenta al medio, se aprecia poca alteración en la roca encajonante.



Figura 47. Alteración en el contacto entre la veta y la roca caja constituida por arcillas y diseminaciones de pirita y algunos óxidos producidos por el contacto con el agua.



Figura 48. Texturas crustiformes y coloformes, las bandas oscuras están conformadas por marmatita y galena y las bandas claras por calcita.



Figura 49. Muestra de mano extraída para análisis, se observa esfalerita, galena y sulfosales diseminadas en pirita.

Las muestras geológicas que antecede ya estudiadas evidencian también que la demostración de mi primera hipótesis es correcta.

9.2. Análisis minerográfico

Se realizó el estudio minerográfico con el fin de determinar los minerales metálicos, tamaño de los minerales identificados, tipo de texturas, asociaciones mineralógicas (relación entre minerales), reemplazamientos y secuencia paragenética (Ver anexo III). El análisis indica la presencia de tres eventos mineralizantes (temprano, principal y tardío).

El evento temprano está caracterizado por la presencia de pirrotita, pirita, arsenopirita, calcopirita II y esfalerita II. La pirrotita se presenta en cristales anhedrales de formas redondeadas, asociada con la calcopirita II, se observa como inclusiones en la pirita; la arsenopirita se manifiesta como cristales subhedrales de hábitos prismáticos, en cortes transversales de formas romboédrica, con bordes angulosos, están como inclusiones en la ganga; la calcopirita II se expone como relictos de cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados, están como inclusiones en algunos cristales de galena y esfalerita II se manifiesta como cristales anhedrales de bordes rectos, subredondeados e irregulares.

MINERALOGÍA		HIPOGENA			SUPERGENA
		Evento Temprano	Evento Principal	Evento Tardío	
MINERALIZACIÓN	Pirrotita	-----			
	Pirita	—————			
	Arsenopirita	---			
	Calcopirita	--	--		
	Esfalerita	-----			
	Galena		-----		
	Cobres Grises		-----	--	
	Sulfosales de Plomo			-----	
	Covelita			----	
MAYOR TEMPERATURA INICIAL →		← MENOR TEMPERATURA FINAL			
		Escaso	Moderado	Abundante	

Figura 50. Secuencia paragenética de la zona centro.

La etapa principal se caracteriza por el contenido de pirita, calcopirita III, galena, esfalerita III, cobres grises, sulfosales de plomo y alabandita. La calcopirita III se da en formas subredondeadas, redondeados,

está como disolución en la esfalerita II; la esfalerita III está presente como cristales anhedrales de bordes subredondeados, intercedida con la esfalerita II, reemplaza a la galena, otros están como relictos en los cobres grises; la esfalerita III se muestran como agregados lenticulares de aspectos masivos de bordes subredondeados e irregulares, reemplaza a la pirita y calcopirita II; la galena se muestra como formas irregulares con bordes subredondeados y redondeados, reemplaza a la pirita y por sectores se observa como inclusiones; la alabandita se halla como cristales euhedrales de hábitos cúbicos con bordes subangulosos y redondeados, como agregados masivos de formas irregulares, intercrecido con la los minerales no metálicos, bordean a la esfalerita III como coronas; los obres Grises (Tetraedrita) están presentes como cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados, reemplazan a algunos cristales de calcopirita, además se muestran como inclusiones diseminadas en la alabandita.

Por último, el tercer evento o evento tardío está representado por pirita, esfalerita III, cobres grises, sulfosales de plomo. La pirita se observa como relictos de cristales de formas cúbicas y piritóédricos de bordes angulosos, subredondeados e irregulares; la esfalerita III se muestra como agregados lenticulares de aspectos masivos de bordes subredondeados e irregulares, reemplaza a la pirita y calcopirita II, los cobres grises (Tetraedrita-Tennantita) se hallan como cristales anhedrales de aspectos masivos con bordes subredondeados, redondeados e irregulares, reemplaza a la galena, calcopirita II y esfalerita III, rellenan intersticios en la pirita; por ultimo las sulfosales de plomo ¿Bournonita? se manifiestan como cristales anhedrales maclados de bordes redondeados y subredondeados, intercrecido con los cobres grises y reemplaza a la galena.

Los descritos anteriormente se correlacionarán con las etapas paragenéticas en yacimientos cordilleranos propuestas por Catchpole et al. (2015) y con los estadios de mineralización propuestos en otros yacimientos del mismo tipo como en Cerro de Pasco (Rottier et al, 2018), La Tapada (Bernaola et al, 2019), Ayawilca (Uzieda et al, 2020), Proyecto Zoraida (Supa, 2021), entre otros en el Capítulo X. Análisis y discusión de resultados.

MINERALOGÍA		HIPÓGENA			SUPERGENA
		Evento Temprano	Evento Principal	Evento Tardío	
MINERALIZACION	Pirita	-----			
	Calcopirita	-----	----		
	Galena	-----			
	Esfalerita	-----	-----		
	Alabandita		-----		
	Cobres Grises		-----	----	
MAYOR TEMPERATURA INICIAL		→ MENOR TEMPERATURA FINAL			
		Escaso -----	Moderado -----	Abundante -----	

Figura 51. Secuencia paragenética de la zona norte.

MINERALOGÍA		HIPÓGENA			SUPERGENA
		Evento Temprano	Evento Principal	Evento Tardío	
MINERALIZACIÓN	Pirita	-----	-----	----	
	Arsenopirita	-----	----		
	Calcopirita	-----	-----		
	Galena	-----	-----		
	Esfalerita		-----	-----	
	Cobres Grises		-----	----	
	Sulfosales de Plomo			-----	
MAYOR TEMPERATURA INICIAL		→ MENOR TEMPERATURA FINAL			
		Escaso -----	Moderado -----	Abundante -----	

Figura 52. Secuencia paragenética de la zona norte.

Las secuencias paragenéticas que anteceden también refuerza la verificación y demostración de mi primera hipótesis, así como de mis objetivos generales específicos y corroboran que mis conclusiones son acertadas.

Con los trabajos que antecede he cumplido con mi objetivo general (Realizar un estudio geológico de la veta Pierina) y mi primer objetivo específico (efectuar la geología local que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía de la veta Pierina), además he demostrado mi primera hipótesis específica (es posible estudiar la geología local que incluye litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía de la veta Pierina, generando así la segunda conclusión de mi tesis.

10. CAPÍTULO X. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la información recopilada, analizada y mostrada en los ítems anteriores, tales como geología local y estructural, análisis geoquímico, análisis mineralógico, alteraciones y paragénesis mineral se procederá a realizar una comparativa de estas características con las características de otros yacimientos similares tipo cordilleranos como Morococha, la tapada en Carhuacayán y proyecto Zoraida en Andaychagua.

10.1. Geología del yacimiento

El yacimiento minero Huinac está caracterizado por presentar vetas polimetálicas (Ag, Zn, Pb, Cu) en rocas pizarrosas con metamorfismo de bajo grado y también de grado medio además de intrusiones y/o diques de composición pórfido andesíticas. Se presenta la alteración argílica, sericitica y propilitica principalmente. Basado en la información geológica mostrada anteriormente se realizó una tabla comparativa que muestra las características de un yacimiento tipo cordillerano y ejemplos de estos, incluido la veta Pierina del yacimiento minero Huinac (Tabla 16).

Tabla 16

Comparación de yacimientos cordilleranos con la veta Pierina.

Yacimiento tipo cordillerano (características)		Veta Pierina- Huinac	Proyecto La Tapada- Carhuacayán	Cuerpos y vetas polimetálicas de Morococha
Estilo de mineralización	<i>Vetas Cuerpos de reemplazamiento</i>	Vetas	Vetas Mantos de reemplazamiento	Vetas Cuerpos de reemplazamiento
Roca hospedante	<i>Rocas silicatadas y carbonatadas</i>	Pizarras Andesitas porfiríticas	Rocas carbonatadas Sedimentos silicoclásticos Pórfido dacítico	Rocas carbonatadas Andesitas Dioritas- Granodioritas
Estado de sulfuración	<i>Baja-Intermedia- Alta sulfuración</i>	Baja - Intermedia sulfuración	Baja - Intermedia sulfuración	Baja-Intermedia- Alta sulfuración
Menas principales	<i>Ag-Zn-Pb-Cu</i>	Ag-Zn-Pb-Cu	Zn-Pb-Ag	Zn-Pb-Ag-Cu

Nota: Se muestra las características de los yacimientos cordilleranos y ejemplos de estos.

10.2. Paragénesis mineral y estadios de mineralización

Basado en las secuencias paragenéticas y/o eventos mineralizantes identificados en las muestras analizadas, se realizó un resumen generalizado de la posible paragénesis de la veta Pierina donde se muestra la paragénesis y estadios de mineralización de dicha veta (Figura 54), esta información se contrastó con la secuencia paragenética de las vetas polimetálicas de Morococha y la secuencia paragenética y/o estadios del proyecto Zoraida (Figura 53).

Se ha encontrado similitudes en la paragénesis con las vetas polimetálicas de Morococha tales como la presencia de pirita, pirrotita, arsenopirita, y calcopirita en la primera etapa (Cuarzo-Pirita) de acuerdo a Catchpole et al. (2015), también es notorio la presencia de la subetapa cuarzo por la ausencia de calcopirita y esfalerita en este intervalo (identificado en las secuencias paragenéticas de las muestras analizadas); además es muy notorio la similitud en la etapa denominada “Metales base”, incluida las subetapas propuestas por Catchpole et al. (2015), se puede observar en esta etapa las similitudes presentes en el comportamiento de la esfalerita, cobres grises, sulfosales de plomo y aparición de carbonatos formado texturas que indican reemplazamiento.

Se ha identificado en la veta Pierina los tres estadios denominados A, B y C identificados por distintos autores en otros yacimientos como por ejemplo en Cerro de Pasco (Rottier et al, 2018), La Tapada (Bernaola et al, 2019), Ayawilca (Uzieda et al, 2020), Proyecto Zoraida (Supa, 2021), entre otros. El estadio A se reconoce a través de los minerales típicos de este estadio tales como, pirrotita y esfalerita rica en hierro (marmatita); arsenopirita (típico de baja sulfuración) y calcopirita; en algunos casos estos minerales se encuentran reemplazados por minerales del segundo estadio o tercer estadio. El estadio B se manifiesta a través del reemplazamiento que se produce en la pirrotita y la arsenopirita transformándolas a pirita masiva, subhedral y anhedral,

además de la ausencia de sulfuros de Cu y Zn como se muestra en las secuencias paragenéticas de las muestras analizadas.

Por último, el estadio C se reconoce por sus características de intermedia sulfuración, presenta minerales como esfalerita (pobre en hierro), galena, tennantita-tetraedrita y otros sulfosales de plomo, calcopirita, alabandita, rodocrosita (muy típico) y otros carbonatos, caolinita. Este estadio suele ser el más importante a diferencia de los estadios anteriores debido a que contiene las mayores cantidades de plata.

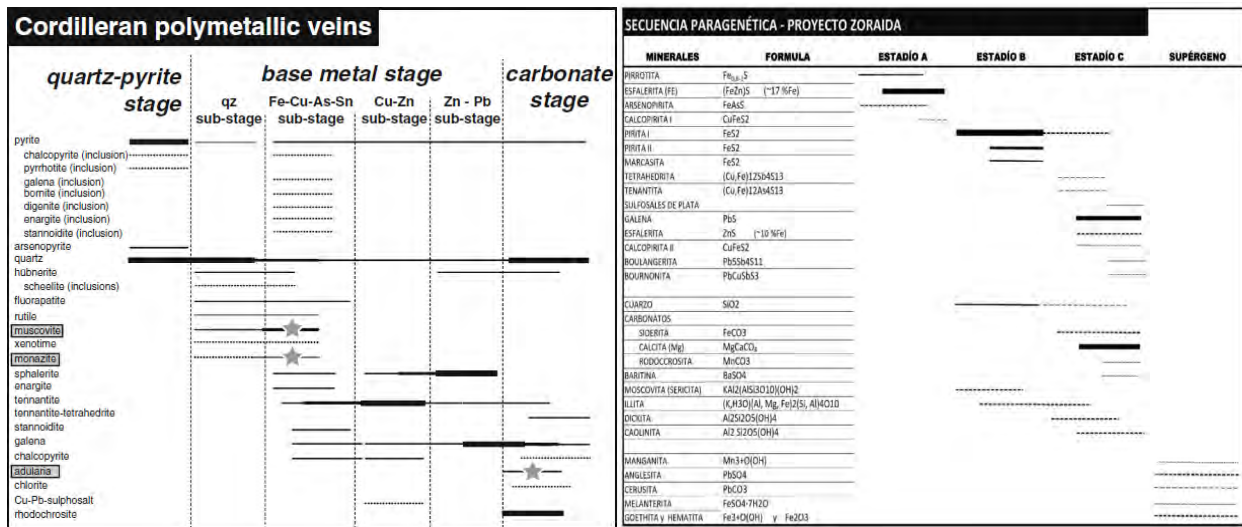


Figura 53. Secuencia paragenética de las vetas polimetálicas de Morococha a la derecha y a la izquierda los estadios del proyecto Zoraida - Carhuacayán.

Mineralogía	Etapa de cuarzo - pirita	Etapa de metales base				Etapa de carbonatos	Etapa Supergena
		Sub etapa de cuarzo	Sub etapa de Fe-Cu-As-Sn	Sub etapa de Cu-Zn	Sub etapa de Zn-Pb		
		Estadio A	Estadio B	Estadio C			
Pirita	_____				_____		
Pirrotita	-----						
Arsenopirita	-----						
Calcopirita II	-----		-----				
Calcopirita III			-----				
Galena			-----				
Esfalerita II		-----	-----				
Esfalerita III				_____	_____		
Alabandita				_____	_____		
Cobres Grises				-----	-----		
Sulfosales de Plomo				-----	-----		
Covelita						-----	
Menor temperatura inicial		→				Mayor temperatura final	
Escaso -----		Moderado -----		Abundante -----			

Figura 54. Secuencia paragenética y estadios reconocidos de la veta Pierina - Huinac. Elaborado por el autor.

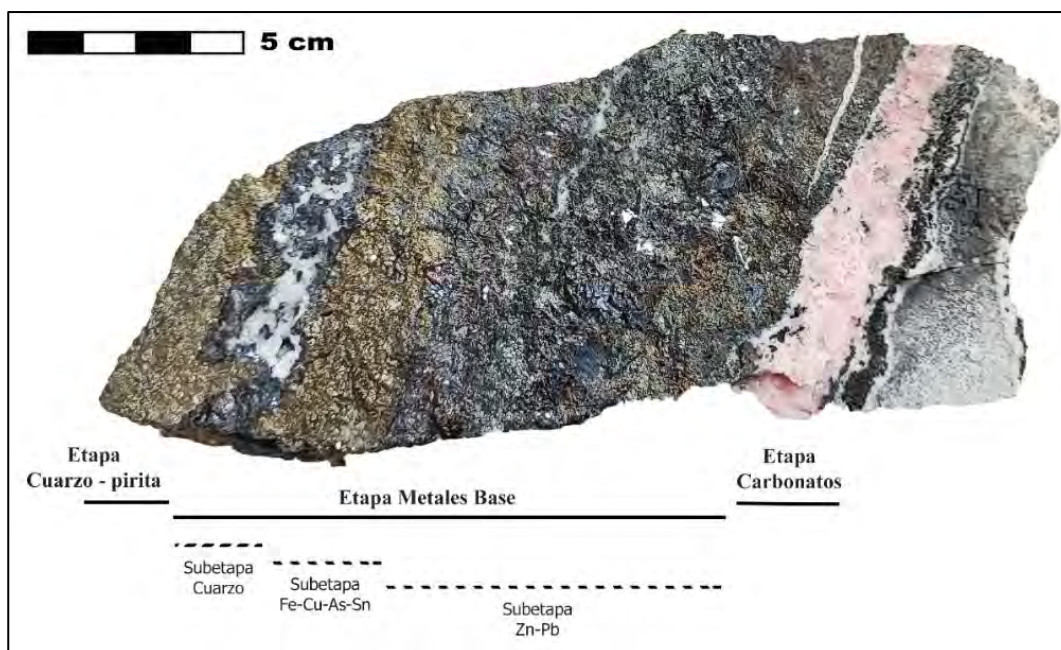


Figura 55. Muestra de la veta Pierina, se aprecia las etapas de cuarzo-pirita y etapa de metales base, que incluye varias subetapas y la etapa de carbonatos. Elaborado por el autor.

10.3. Zonación mineralógica

En la mayoría de depósitos cordilleranos, regularmente se presenta una zonación muy marcada en los minerales de mena y en minerales de alteración, pero no es un rasgo indispensable en estos depósitos (Fontboté y Bendezú, 2009).

En el caso de la veta Pierina se ha obtenido un zoneamiento similar al mostrado por Catchpole et al. (2012) en las vetas polimetálicas de Morococha (Figura 56) donde se puede observar similitudes en el comportamiento del cobre, zinc y plomo; la plata se comporta de manera independiente, lo que le da características particulares a este yacimiento.

Analizando la zonación en la veta Pierina lo primero que resalta es el incremento de minerales de cobre (Cu) en la zona norte (centro del sistema) representados por minerales como tenantita, tetraedrita y calcopirita, seguido de la disminución del mismo elemento hacia la zona sur (zonas externas del sistema) como se puede apreciar en la figura 56; es notorio también la disminución del zinc y plomo en la zona norte y el incremento de estos mismos elementos hacia las zonas

externas del sistema (zona sur) representado básicamente por minerales como la esfalerita, galena y algunos sulfosales de plomo. En cuanto a la plata se observa cierta particularidad debido a que su presencia es notoria en todo el sistema disminuyendo ligeramente hacia la parte sur o zonas externa del sistema, por ejemplo, en la zona norte la plata se correlaciona muy bien con el cobre y disminuye el valor de su correlación hacia el sur; caso contrario ocurre en la correlación de la plata con el plomo y zinc donde el valor de la correlación disminuye ligeramente de sur a norte.

En resumen, la zonación de la veta Pierina se caracteriza por tener zonas internas donde predomina minerales como pirita, pirrotita, arsenopirita, tennantita, tetraedrita, sulfosales de plomo (¿bournonita?), calcopirita y las partes externas dominadas por esfalerita, galena, carbonatos (calcita, rodocrosita y otros), sericita, caolinita y otras arcillas). Siendo el sector norte (zona interna del sistema) el sector donde se debería enfocar la exploración geológica, esto se detallará en el capítulo XI Conclusiones y Recomendaciones.

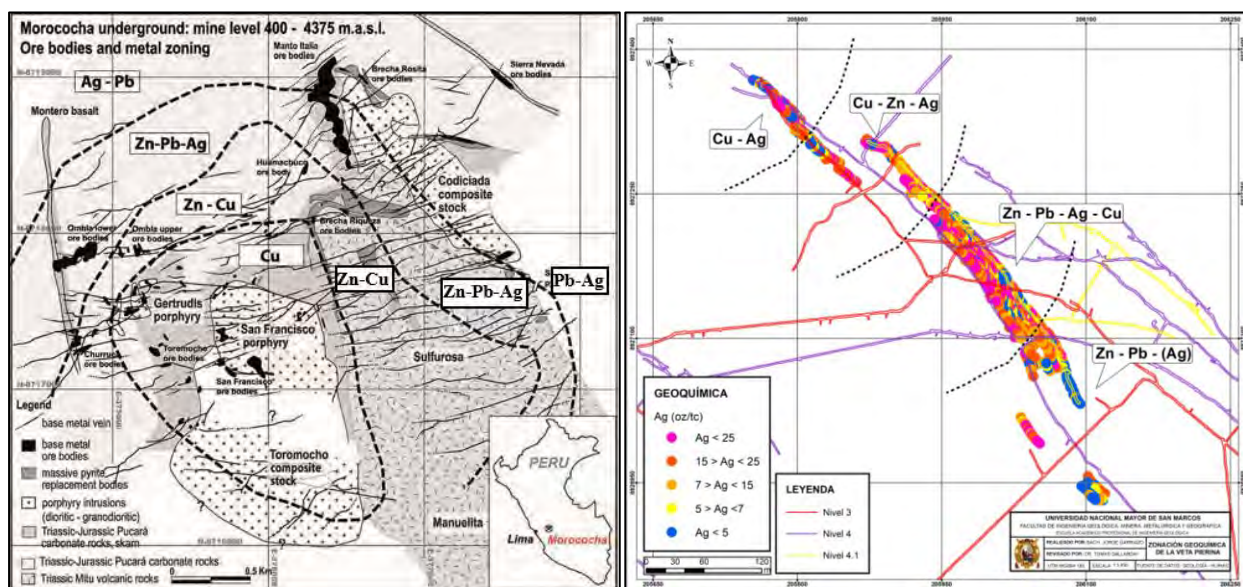


Figura 56. Comparación de la zonación mineralógica entre las vetas polimetálicas de Morococha y la veta Pierina del yacimiento minero Huinac.

Con los trabajos que antecede he cumplido con mi objetivo general (Realizar un estudio geológico de la veta Pierina, en el yacimiento minero Huinac, unidad económica minera Admirada Atila, Aija, Ancash, Perú.) y con mi segundo y tercer objetivo específico (Correlacionar litología, estructuras geológicas, geoquímica, mineralogía para determinar las fases mineralizantes, génesis y tipo de yacimiento al cual pertenece la veta Pierina y Recomendar la exploración geológica sobre el rumbo de la veta Pierina), además he demostrado mi hipótesis general (La determinación de las características geológicas (litológica, estructuras geológicas, geoquímica y mineralogía,) de la veta Pierina, ayudará a orientar y seguir la exploración y sumar a la explotación) y mi segunda y tercera hipótesis específica (Las características geológicas de la veta Pierina se pueden analizar y relacionar para identificar sus eventos mineralizantes, su génesis y proponer el modelo o tipo de yacimiento al cual pertenece y La orientación de la exploración geológica estará en función a la geología local y al tipo de yacimiento de la veta Pierina), generando así la tercera y cuarta conclusión de mi tesis.

Mi tesis ha sido realizada siguiendo las normas del método científico, el mismo que dice desarrollar un problema mediante la observación, descripción, análisis, comparación como es el trabajo que antecede y concluir para de esta manera poder hacer las recomendaciones del caso al lector que quiera ampliar sus conocimientos sobre el tema, al equipo de geología y al directorio de empresa minera Huinac SAC.

11. CAPÍTULO XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones

➤ La veta Pierina se caracteriza por ser una estructura con contenido mineral polimetálico (Ag-Zn-Pb-Cu) con características de baja a intermedia sulfuración, cuya roca encajonante está representada por pizarras con un metamorfismo bajo a moderado y andesitas porfíricas.

➤ El comportamiento geoquímico y mineralógico de la veta Pierina nos indica que existe un zoneamiento central representado por minerales de cobre y plata al norte de la veta, y un zoneamiento en las partes medias y distales representado por minerales de zinc, plomo y plata al sur de la veta.

➤ De acuerdo a las características geológicas, geoquímicas y mineralógicas de la veta Pierina y considerando la información o bibliografía existente, además de relacionarla y compararla con yacimientos similares, esta veta pertenecería a un yacimiento del tipo Butte o denominado también Cordillerano, cuyos eventos mineralizantes fueron: una etapa temprana con características de baja sulfuración, una segunda etapa caracterizada principalmente por la presencia de pirita y una etapa final con características de intermedia sulfuración y fuerte presencia de minerales de zinc, plomo, plata y cobre, cabe recalcar que esta última etapa es económicamente más importantes que la anteriores.

➤ Las características geológicas de la veta Pierina nos indican que en la zona norte se tendría mayor potencial de recursos minerales, debido a que la zona norte sería el centro del sistema cordillerano, esto quiere decir que faltaría desarrollar la otra mitad del sistema aún por descubrir. Por otro lado, en cuanto a la zona sur también se debe explorar con el fin de determinar los límites del sistema. Cabe recalcar que debemos tener en cuenta las características litológicas en la exploración de ambas zonas.

11.2. Recomendaciones

Primero que nada, quisiera pedir disculpas al lector por cualquier inconveniente que puedan haber causado los errores ortográficos y otros descuidos cometidos u omitidos en el presente informe de tesis, reconozco la importancia de la precisión y la calidad en la presentación de la información, y lamento cualquier distracción que estos errores hayan podido causar.

➤ Se recomienda al directorio de compañía minera Huinac S.A.C:

-Invertir en la exploración geológica (a través de campañas de perforación diamantina) de la veta Pierina y otras vetas hacia ambos sentidos norte y sur con el fin de reconocer los límites del sistema, pero con previo conocimiento de que las reservas se incrementarán hacia la zona norte de la veta Pierina.

➤ Se recomienda a los geólogos que integran el equipo de geología de minera Huinac:

-Realizar mayores estudios en otras vetas con el fin de determinar sus características y validar si estas pertenecen o no a un yacimiento del tipo cordillerano.

-Llevar a cabo el modelamiento geológico considerando la litología, alteración y tipo de mineralización, además de realizar una interpretación geológica sistemática en planos y secciones, esto implica integrar de manera coherente y sistemática la información de los distintos niveles con el fin de establecer correlaciones tridimensionales.

➤ Se recomienda a las autoridades locales de La Merced, Aija:

-Dar facilidades a la empresa minera Huinac desarrollar la exploración y explotación de este yacimiento, ya que es y será un beneficio económico para los pueblos aledaños a este yacimiento.

➤ Se recomienda al lector:

-Recurrir a la bibliografía de este informe de tesis para aclarar o profundizar ciertos temas que se requiera.

12. CAPÍTULO XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación: Introducción a la investigación científica*. Caracas: Editorial Episteme, C.A.
- Barton, P., & Skinner, B. (1979). Sulfide Mineral Stabilities. En H. Barnes, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (págs. 278-403). New Jersey: Wiley Interscience Publication.
- Bartos, P. (1989). Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationship to underlying porphyry copper deposits. *Economic Geology*, Vol. 84, 1671-1683.
- Baumgartner, R., Fontboté, L., & Vennemann, T. (2008). Mineral Zoning and Geochemistry of Epithermal Polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi Mineralization at Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology*, Vol. 103, 493-537.
- Bernaola, R., Espinoza, S., Díaz, M., Figueroa, O., Farfán, C., & Fontboté, L. (2019). Estadios de mineralización en La Tapada, yacimiento cordillerano polimetálico Carhuacayán, Perú Central: su aplicación para modelar recursos y definir nuevos targets de exploración. *XI Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores*, (págs. 73-77). Lima.
- Bodenlos, A., & Straczek, J. (1957). *Base-Metal Deposits of the Cordillera Negra Departamento de Ancash, Peru*. Washington: Oficina de Impresión del Gobierno de los Estados Unidos.
- Burt, D., & Rose, A. (1979). Hydrothermal Alteration. En H. Barnes, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (págs. 173-235). New Jersey: Wiley Interscience Publication.
- Candela, P. A. (1994). Combined chemical and physical model for plutonic devolatilization: A non-Rayleigh fractionation algorithm. *Geochimica et Cosmochimica*, Vol. 58, 2157-2167.
- Carhuapoma, J. (2020). *Caracterización petrológica de las muestras de roca con el analizador XRF portátil Niton XL5 para contribuir a la ubicación de zonas de ocurrencia mineral en*

- el proyecto minero Zoraida, Distrito de Suitucancha – Yauli - Junín*. Cerro de Paco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Carrasco, D. (2017). *Caracterización geológica y distribución geoquímica en el Diseminado Polimetálico Huinac*. Arequipa: Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
- Catchpole, H., Fontboté, L., & Kouzmanov, K. (2012). Copper-Excess Stannoidite and Tennantite-Tetrahedrite as Proxies for Hydrothermal Fluid Evolution in a Zoned Cordilleran Base Metal District, Morococha, Central Peru. *The Canadian Mineralogist*, Vol. 50, 719-743.
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Fontboté, L., Guillong, M., & Heinrich, C. (2011). Fluid evolution in zoned Cordilleran polymetallic veins - Insights from microthermometry and LA-ICP-MS of fluid inclusions. *Chemical Geology*, Vol. 281, 293-304.
- Catchpole, H., Stein, H., Fontboté, L., Kouzmanov, K., BendeZú, A., Ovtcharova, M., & Spikings, R. (2015). Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru. *Springer-Verlag*, Vol. 50, 895–922.
- Chavez, L., Navarro, P., Rodríguez, F., & Martiarena, R. (2010). Estratigrafía Volcánica del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico) – Sector Norte del Segmento Cordillera Negra, Región Áncash. *XV Congreso Peruano de Geología* (págs. 838-842). Cusco: Sociedad Geológica del Perú.
- Cobbing, J., Sánchez, A., Martínez, W., & Zárate, H. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquian y Yanahuanca*. Lima: INGEMMET.
- Corbett, G., & Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems : Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologist, Special Publication*, 237.
- Dávila, J. (2011). *Diccionario Geológico*. Lima: INGEMMET.

- Einaudi, M. (1982). Description of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America, in Titley, S. R., ed., *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America: Tucson, AZ. University of Arizona Press*, 139-184.
- Einaudi, M., Hedenquist, J., & Inan, E. (2003). Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments. *Society of Economic Geologists Special Publication*, Vol. 10, 285-313.
- ephpTecsup. (01 de 03 de 2023). *Yacimientos Tipo Skarn, CRD y Cordilleranos en Perú*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=xjZemRkpO8Q>
- Estatuto UNMSM. (2016). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Figueras, S., & Gargallo, P. (2003). *Análisis Exploratorio de Datos*. Obtenido de 5campus.com, Estadística: <<http://www.5campus.com/leccion/aed>
- Fontboté, L., & Bendejú, R. (2009). Cordilleran or Butte-type Veins and Replacement Bodies as a Deposit Class in Porphyry Systems. *10th Biennial Society of Geology Applied to Ore Deposits Meeting*, (págs. 521-523). Townsville.
- Giggenbach, W. (1987). *Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand*. Petone: Applied Geochemistry.
- Gobierno del Perú, Constitución Política del Perú. (1993). Lima: Gobierno del Perú.
- Gobierno del Perú, Ley N.º 30220. (2014). Lima: Diario El Peruano.
- Gonzáles, J. (2021). *Análisis tectónico y estructural del volcánico Calipuy en la Cordillera Negra (Áncash) mediante el uso de software libre*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Hedenquist, J., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N., Giggenbach, W., & Aoki, M. (1994). Geology, geochemistry, and origin of high sulfidation Cu-Au mineralization in the Nansatsu district, Japan. *Economic Geology*, Vol. 89, 1-30.
- Heinrich, C. A., Ryan, C. G., Mernagh, T. P., & Eadington, P. J. (1992). Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: a fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, Vol. 87, 1566–1583.
- Hemley, J., & Hunt, J. (1992). Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: II. Some general geologic applications. *Economic Geology*, Vol. 87, 23-43.
- Hurlbut, C. (1959). *Manual de mineralogía de Dana*. Barcelona: Reverte.
- Instituto Geológico, M. y. (18 de Marzo de 2020). *INGEMMET*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/ingemmet/informes-publicaciones/1762447-metalogenicos-mapas>
- Martins, F., & Palella, S. (2012). *Metodología de la Investigación Cuantitativa (3ra ed.)*. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (FEDUPEL).
- Matheron, G. (1963). *Traité de géostatistique appliquée*. París: Technip.
- Meyer, C., & Hemley, J. (1967). Wall Rock Alteration. En H. Barnes, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Primera Edición* (págs. 166-235). New York: Holt, Rinehart and Winston Inc.
- Nesse, W. (1999). *Introduction to Mineralogy*. Oxford: Oxford University press.
- Orellana, L. (2001). Estadística descriptiva. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Pearson, K. (1895). Contributions to the mathematical theory of evolution.-II. Skew variation in homogeneous material. *The Royal Society*, Vol. 186, 343 - 414.

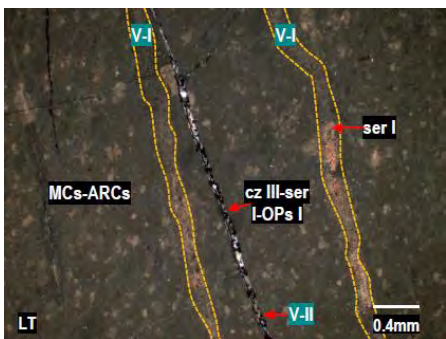
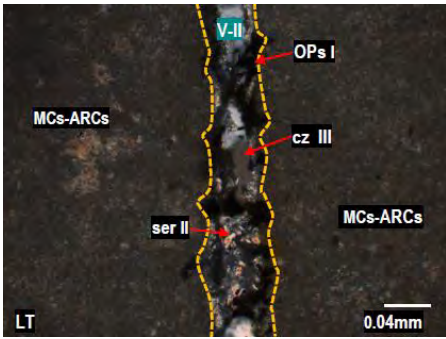
- Petersen, U. (1965). Regional geology and major ore deposits of central Peru. *Economic Geology*, Vol. 60, 407-467.
- Pirajno, F. (1992). *Hydrothermal Mineral Deposits Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Grahamstown: Springer-Verlag.
- Ponzoni, E. (1980). *Metalogenia del Perú*. Lima: INGEMMET.
- Reed, A. (1997). Hydrothermal Alteration and Its Relationship to Ore Fluid Composition. En H. Barnes, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Tercera Edición* (págs. 303-366). Nueva Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- Rivera, H. (2005). *Geología General*. Lima: Megabyte.
- Rottier, B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Wälle, M., & Fontboté, L. (2018). Cyclic Dilution of Magmatic Metal-Rich Hypersaline Fluids by Magmatic Low-Salinity Fluid: A Major Process Generating the Giant Epithermal Polymetallic Deposit of Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology*, Vol. 113, 825–856.
- Supa, R. (2021). *Principales estadios de mineralización del yacimiento polimetálico tipo Cordillerano, Proyecto Zoraida - U.P. Andaychagua, Volcan Compañía Minera S.A.A. Junín – Perú*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Titley, S. (1992). Characteristics of Porphyry Copper Occurrence in the American Southwest. En: Mineral Deposit Modelling. *Mineral Deposit Modelling: Geological Association of Canada*, 433-464.
- Townley, B. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. *Inglomayor*, Vol. 19, 3-90.

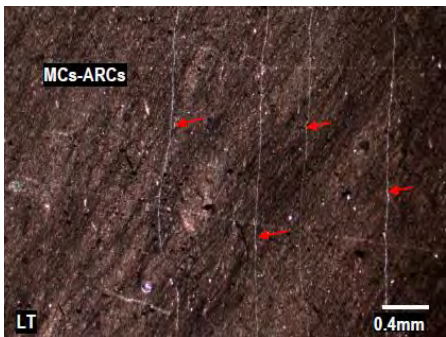
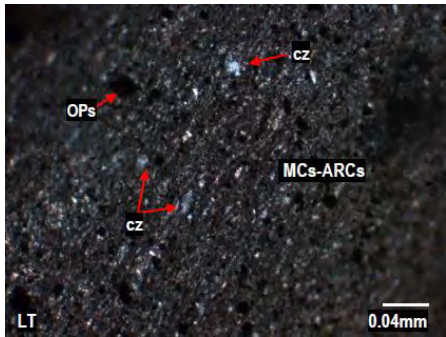
- Uzieda, M., Fontboté, L., Kouzmanov, K., Harlaux, M., Benites, D., Torró, L., & Fernández, Á. (2020). Mineralization stages at the Ayawilca Zn-Pb-In-Ag-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru: new insights. *18th Swiss Geoscience Meeting*, (págs. 52-53). Zurich.
- Velarde, M. (2012). *Prospección geológica y geoquímica del Diseminado Polimetálico Huinac - La Merced - Aija - Ancash*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Villarreal, E., Rivera, R., & Santisteban, A. (2010). Características metalogenéticas de la Cordillera Occidental en la Región Áncash. *XV Congreso Peruano de Geología* (págs. 684-688). Cusco: Sociedad Geológica del Perú.
- White, N., & Hedenquist, J. (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 36,445-474.

13. CAPÍTULO XIII. ANEXOS

13.1. Anexo I. Análisis Petrológico

Pórfido Cuarzo Andesítico con fuerte alteración filica	
Muestra P-4 	Descripción microscópica: Está compuesto por fenocristales de anfíboles, plagioclasas I, feldespato potásico I, cuarzo primario englobado en una matriz completamente reemplazada por agregados de cuarzo II, sericita, cloritas y carbonatos. La textura porfirítica nos indica dos etapas de enfriamiento primero lenta y luego rápida. Ocurre un primer evento de alteración de modo pervasivo donde anfíboles están reemplazados por muscovita-sericita, carbonatos, rutilo y minerales opacos I. Además, donde las plagioclasas I y feldespatos potásicos I son reemplazados por sericita y carbonatos. Finalmente ocurre una silicificación en modo de vetillas rellenas de cuarzo III con minerales opacos II.
Texturas:	Roca: Porfirítica Alteración: Penetrativa y vetilla. Mineralización: Diseminada y vetilla.
Tipo de alteración	-Fílica, penetrativa, fuerte, (cuarzo II+sericita+carbonatos+cloritas+ opacos I) -Silicificación, Vetillas, Débil, (Cuarzo III+opacos II)
	Fenocristales de cuarzo primario (cz I) de bordes engolfados, moldes de fenocristales de anfíboles (ANFs) reemplazados por minerales opacos (OPs), muscovita (mus) y carbonatos (CBs) en una matriz reemplazada por cuarzo II (cz II). Además, nótese como los carbonatos están reemplazando a los cristales de plagioclasas (PGLs I).
	Vetilla rellena por cuarzo III (cz III) y minerales opacos II (OPs II) que rellena una fractura, además una alteración pervasiva de sericita (ser) sobre las plagioclasas I con algunas inclusiones de cristales de minerales opacos I (OPs I).

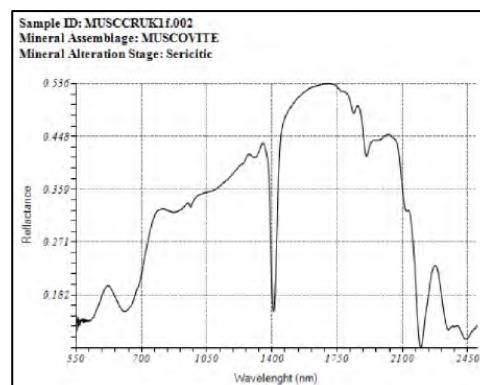
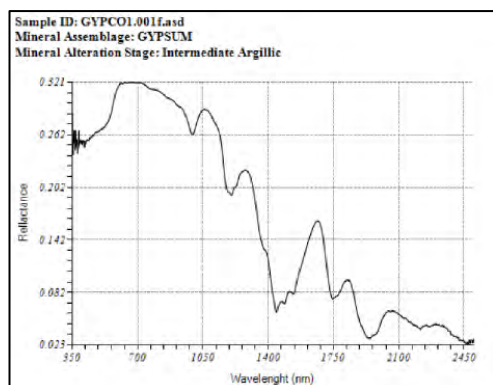
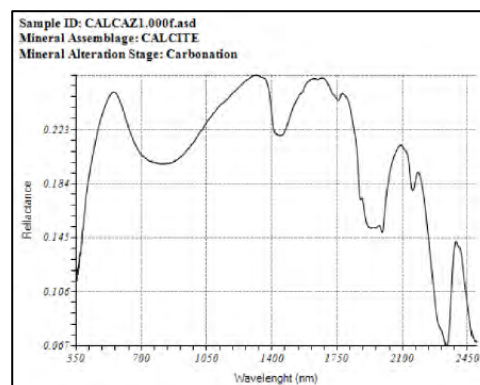
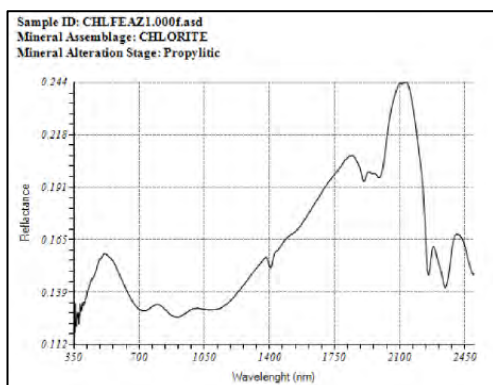
Pizarra Sericítica de textura mosqueada de protolito pelítico (Lutita)	
Muestra R-7 	Descripción microscópica: Está compuesto principalmente por micas (sericita I) y minerales arcillosos, seguido de escaso cuarzo. Se observa que las micas están son reemplazadas por arcillas. También se observan minerales accesorios como zircón y rutilo dispersos en las micas. La roca representa textura Mosqueada formada por agregados de micas y arcillas, producto de bajo metamorfismo de contacto. El protolito corresponde a una lutita. La muestra es cortada temporalmente por vetillas de sericita II, y posteriormente por vetillas II rellenas de cuarzo III, sericita III, rutilo y minerales opacos I.
Texturas:	Roca: Mosqueada Alteración: Penetrativa y vetilla. Mineralización: Vetilla.
Tipo de alteración	-Sericitización, vetilla, Incipiente, sericita II -Fílica, vetilla, débil, Opacos+/-cuarzo+/-sericita III
	Vetillas I (V-I) de forma rectas rellenas por agregados de sericita I (ser I) de aspectos terrosos, además se observa de forma paralela una vetilla I (V-I) rellena por cuarzo III, sericita II, minerales opacos I (cz III-ser I-OPs I)
	Vetilla II (V-II) rellenas de cuarzo III (cz III), sericita II (ser II), y minerales opacos II (OPs I), que corta la roca compuesta por micas (MCs) y minerales arcillosos (ARCs).

Pizarra de Cordierita-Clorita de protolito pelítico (Lutita)	
Muestra Q-252 	Descripción microscópica: La roca está compuesta por porfidoblastos de cordierita-cloritas-cuarzo inmerso en una matriz construida por agregados de Micas (sericita), mineral arcilloso y cuarzo; con mineral accesorio de rutilo, así mismo se observa minerales opacos diseminados por toda la muestra. Presenta crucero pizarroso, lo cual indica que los minerales presentan una foliación siguiendo una dirección preferente. Localmente algunos profiroblastos presentan sombras de presión producto de la blastesis.
Texturas:	Roca: Pizarrosa, Porfiroblastica.
Tipo de alteración	-Limonitización, penetrativa, débil, Goethita-hematita
	Pizarra mostrando matriz fina compuesta generalmente por micas (MCs) y minerales arcillosos (ARCs). Nótese además el crucero pizarreño (diagonal) y el crucero con deslizamiento transversal (vertical, ver flechas.)
	Cristales de cuarzo (cz) como alta presencia de minerales opacos (OPs) en una matriz de micas con minerales arcillosos (MCs-ARCs).

13.2. Anexo II. Alteraciones hidrotermales

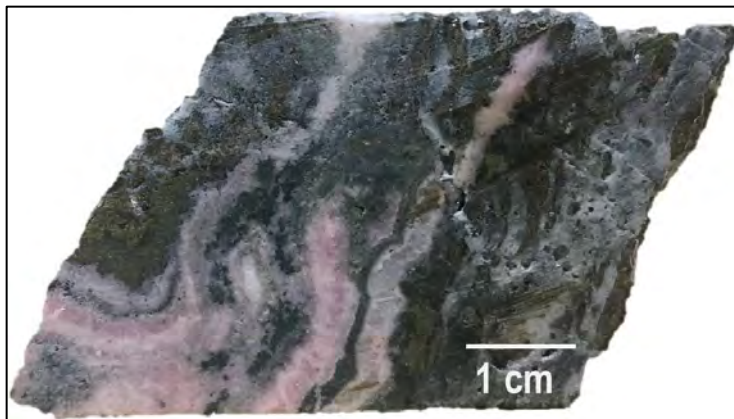
Muestra	Tipo de alteración	Ensamble mineralógico	Zona
P-36_00000	Intermediate Argillic - Sericitic	K-Illite - Muscovite	Zona Norte
Q200_00000	Intermediate Argillic	K-Illite	Zona Sur
Q201_00000	Propylitic - Intermediate Argillic	Chlorite - Beidellite	Zona Sur
Q52_00000	Intermediate Argillic	Beidellite	Zona Norte
Q67_00000	Silicification - Intermediate Argillic - Sericitic	Silica-opaline - Beidellite - Muscovite	Zona Norte
Q73_00000	Intermediate Argillic	K-Illite	Zona Norte
Q74_00000	Silicification - Intermediate Argillic	Silica-opaline - Beidellite	Zona Norte
R20_00001	Intermediate Argillic	K-Illite	Zona Norte
R41_00000	Propylitic - Intermediate Argillic - Carbonation	Chlorite - Beidellite - Rhodochrosite	Zona Sur

Patrones espectrales



13.3. Anexo III. Análisis minerográfico

Muestra R-49



Pirita. Se muestran como cristales anhedrales a euhedrales de hábitos cúbicos y piritoédricos con bordes subredondeados, subangulosos e irregulares, por zonas presentes como agregados de aspectos masivos. Es reemplazada por la esfalerita II y III.

Arsenopirita. Presentes como cristales subhedrales y euhedrales de hábitos prismáticos, en cortes transversales de formas romboédricas, con bordes subredondeados y angulosos. Intercrecido con la pirita, otros están como inclusiones en la esfalerita III.

Galena. Se muestran como formas irregulares con bordes subredondeados y redondeados. Reemplaza a la pirita y por sectores se observa como inclusiones.

Calcopirita II. Ocurren como cristales anhedrales de bordes rectos, subredondeados e irregulares. Es reemplazada por la esfalerita III y galena. Por sectores rellena fracturas en la esfalerita III dando un aspecto veteado.

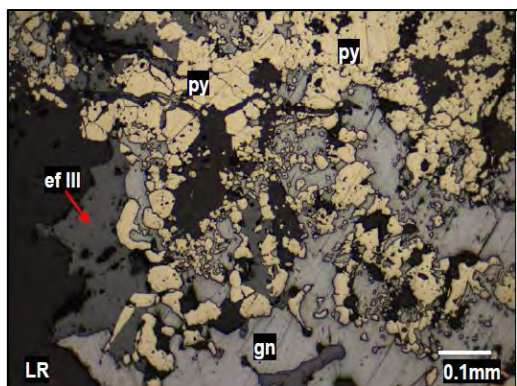
Esfalerita II. Está asociada a la esfalerita III. Cristales anhedrales de bordes subredondeados e irregulares. Presenta disoluciones de calcopirita III conocido como “chalcopirita disease”, la cual indica una temperatura de formación entre de 350° a 400°C según Buerger (1934).

Calcopirita III. Se da como cristales de formas redondeadas y subredondeadas. Presentes en la esfalerita II como disoluciones.

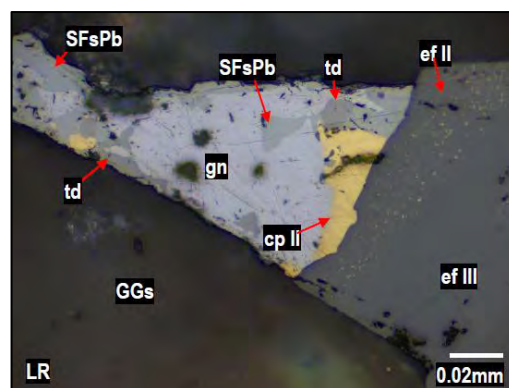
Esfalerita III. Cristales y agregados masivos irregulares formando “filones estratificados” con los minerales no metálicos.

Cobres Grises (Tetraedrita – ¿Tennantita?). Se halla como cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados. Están presentes como inclusiones y reemplazando a la galena y calcopirita II.

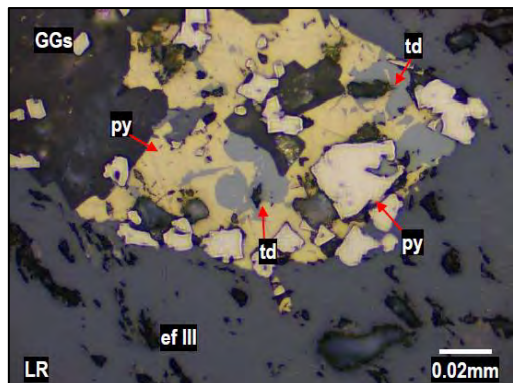
-Sulfosales de Plomo (¿Bournonita?). Se exponen como cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados. Está asociado con los cobres grises.



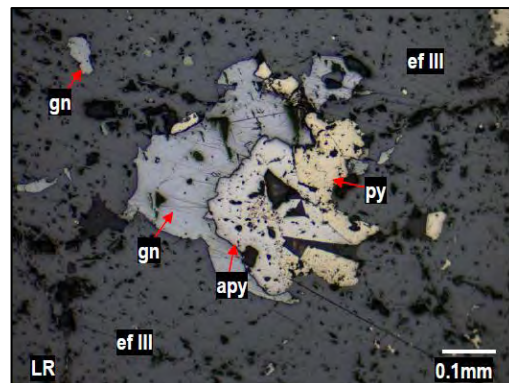
Cristales de pirita (py) en un agregado de aspectos masivo de galena (gn) y asociado con esfalerita III. LR: Luz Transmitida.



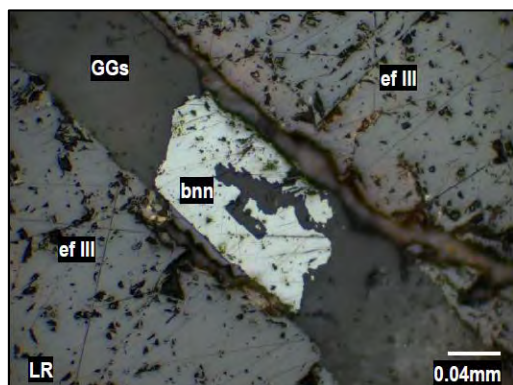
Esfalerita II con disoluciones de calcopirita II (cp II) e intercrecida con esfalerita III (ef III) reemplazando a la calcopirita II (cp II) y galena (gn), esta última es reemplazada por tetraedrita (td) y sulfosales de plomo (SFsPb). LR: Luz Reflejada.



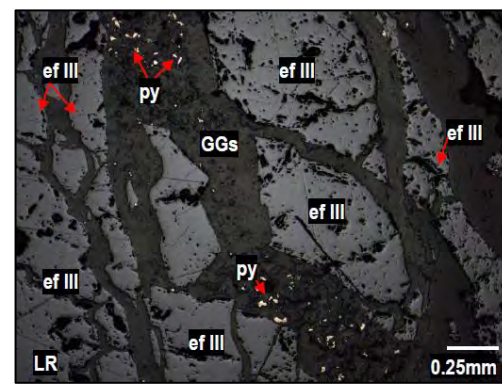
Agregados de pirita (py) asociado a la calcopirita II (cp II) con reemplazamiento de tetraedrita (td), en un agregado masivo de esfalerita III (ef III). LR: Luz Reflejada.



Galena (gn), reemplazado a la pirita (py) y arsenopirita (apy) incluidas en la esfalerita III (ef III). LR: Luz Reflejada.



Agregados de esfalerita III (ef III) cortando vetilla relleno por gangas y bournonita (bnn). LR: Luz Reflejada.



Agregados de lenticulares de esfalerita III (ef III) englobados por minerales de gangas (GGs) con inclusiones de pirita (py). LR: Luz Reflejada.

Muestra Q-78

Pirita. Se observan como relictos de cristales de formas cúbicas y piritoédricos de bordes angulosos, subredondeados e irregulares. Se encuentran asociado y reemplazados por la esfalerita III, por zonas se observan como inclusiones. Algunos están rellenoando intersticios de las gangas.

Esfalerita II. Ocurren como cristales anhedrales de bordes rectos, subredondeados e irregulares. Por zonas presenta disoluciones de calcopirita III conocido como “chalcopyrita disease”; indica una temperatura de formación alrededor de 350° a 400°C según Buerger (1934). Intercrecida con la esfalerita III

Galena. Se exponen como cristales anhedrales de bordes angulosos e irregulares. Rellenan intersticios en las gangas, reemplazado por la alabandita. Algunos se muestran como inclusiones en la pirita.

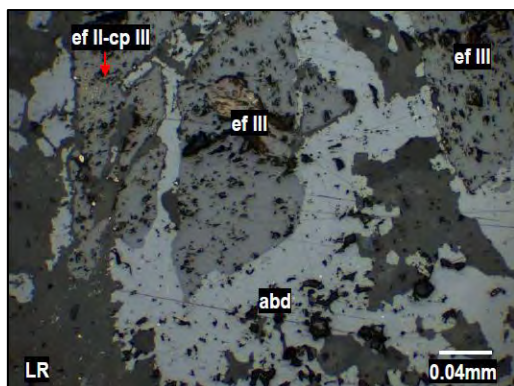
Calcopirita II. Se presentan relictos como formas irregulares de bordes redondeados y subredondeados. Ocurren diseminados en la esfalerita III.

Calcopirita III. Se halla como cristales de formas redondeadas y subredondeadas, Esta como disolución en la esfalerita II.

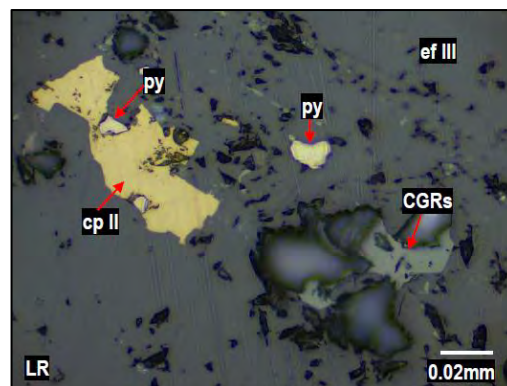
Esfalerita III. Se muestran como agregados lenticulares de aspectos masivos de bordes subredondeados e irregulares. Reemplaza a la pirita y calcopirita II.

Alabandita. Se halla como cristales euhedrales de hábitos cúbicos con bordes subangulosos y redondeados, como agregados masivos de formas irregulares. Intercrecido con la los minerales no metálicos, bordean a la esfalerita III como coronas.

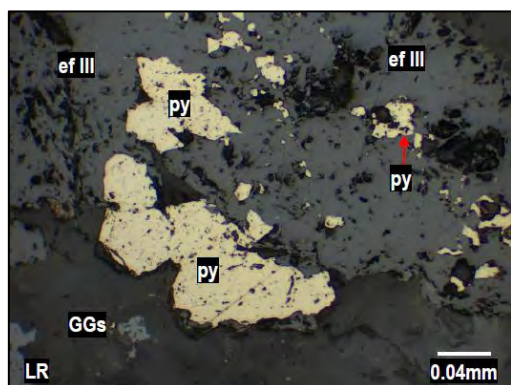
Cobres Grises (Tetraedrita). Presentes como cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados. Reemplazan a algunos cristales de calcopirita, además se muestran como inclusiones diseminadas en la alabandita.



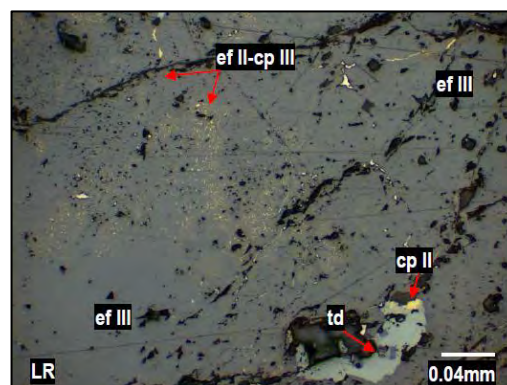
Agregados de esfalerita III (ef III) y esfalerita II (ef II) con disoluciones de calcopirita III (cp III) bordeado como coronas por alabandita (abd). LR: Luz Reflejada.



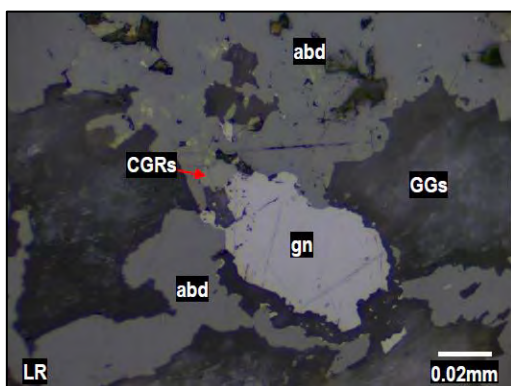
Esfalerita III (ef III) con inclusiones de pirita (py), calcopirita III (cp III) y cobres grises (CGRs) LR: Luz Reflejada.



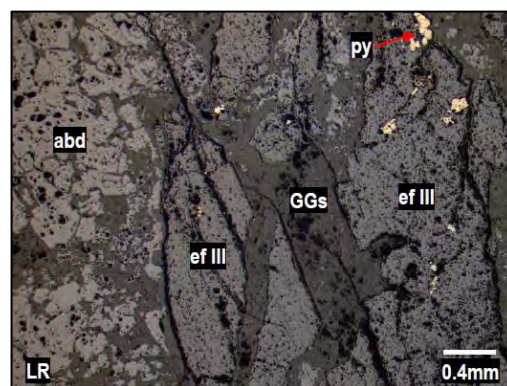
Agregado masivo de esfalerita III (ef III) reemplazando a pirita (py) quedando por sectores como inclusiones. LR: Luz Reflejada.



Esfalerita II (ef II) con disoluciones de calcopirita III (cp III) daña una textura "dusty" asociada con la esfalerita III (ef III) que presentan oquedades rellenas por tetraedrita (td). LR: Luz Reflejada.



Agregados de alabandita (abd) asociado con galena (gn) y cobres grises (CGRs). LR: Luz Reflejada.



Agregados masivos de esfalerita (III) con inclusiones de pirita (py) y asociada con la alabandita (abd), relleno intersticios en las gangas (GGs). LR: Luz Reflejada.

Muestra R-1

Pirrotita. Cristal anhedrales de formas redondeadas, asociada con la calcopirita II. Se observa como inclusiones en la pirita.

Pirita. Se muestra como agregados masivos de cristales anhedrales con bordes subredondeados e irregulares. Por sectores se observan fracturados y rellenos por minerales de gangas, galena y cobres grises. Algunos cristales presentan inclusiones de galena.

Arsenopirita. Se manifiestan como cristales subhedrales de hábitos prismáticos, en cortes transversales de formas romboédrica, con bordes angulosos. Están como inclusiones en la ganga.

Calcopirita II. Se exponen como relictos de cristales anhedrales de bordes redondeados y subredondeados. Están como inclusiones en algunos cristales de galena.

Galena. Presentes como cristales anhedrales con bordes rectos y subredondeados. Reemplaza a la pirita y por zonas se observan relleno de fracturas (fracturas de reemplazamiento) e intersticios, dando un aspecto vetado.

Calcopirita III. Se da formas subredondeadas, redondeados. Esta como disolución en la esfalerita II.

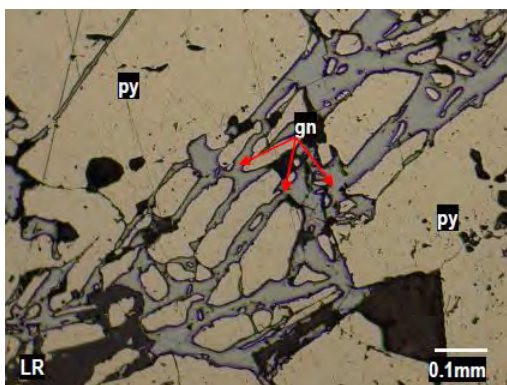
Esfalerita II. Se manifiesta como cristales anhedrales de bordes rectos, subredondeados e irregulares. Por zonas presenta disoluciones de calcopirita III conocido como "*chalcopirita disease*" que indica una temperatura de formación alrededor de 350° a 400°C según Buerger N. (1934).

Esfalerita III. Presentes como cristales anhedrales de bordes subredondeados, intercrecida con la esfalerita II. Reemplaza a la galena, otros están como relictos en los cobres grises.

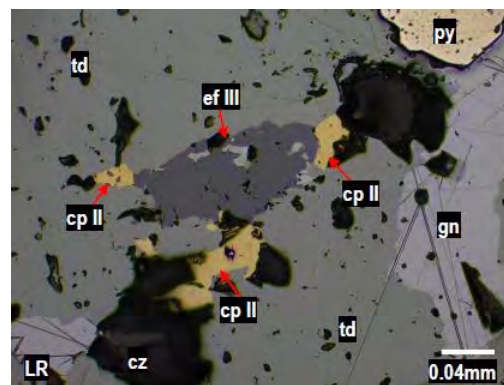
Cobres Grises (Tetraedrita-Tennantita). Se hallan como cristales anhedrales de aspectos masivos con bordes subredondeados, redondeados e irregulares. Reemplaza a la galena, calcopirita II y esfalerita III. Rellena intersticios entre la pirita.

Sulfosales Plomo ¿Bournonita? Se manifiestan como cristales anhedrales maclados de bordes redondeados y subredondeados. Intercrecido con los cobres grises y reemplaza a la galena.

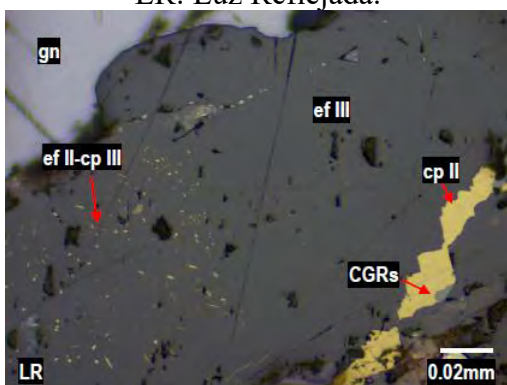
Minerales Secundarios de Cu (Covelita). Se da como cristales anhedrales de bordes subredondeados, presentes como relleno de oquedades en la pirita.



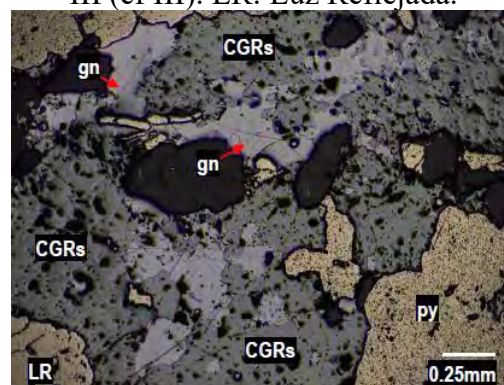
Agregados masivos e islotes de cristales de pirita (py) con fracturas de reemplazamiento por galena (gn) dándole un aspecto veteado. LR: Luz Reflejada.



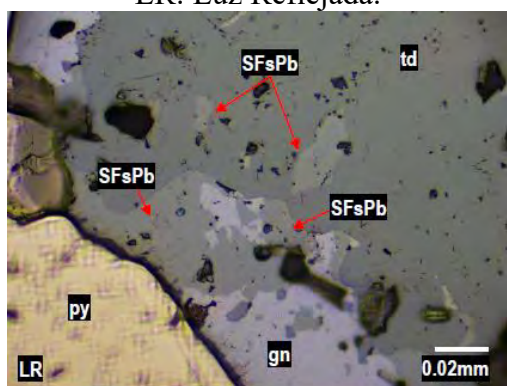
Pirita (py) asociada a tetradrita (td) de aspectos masivos reemplazando a la calcopirita II (cp II), galena (gn) y esfalerita III (ef III). LR: Luz Reflejada.



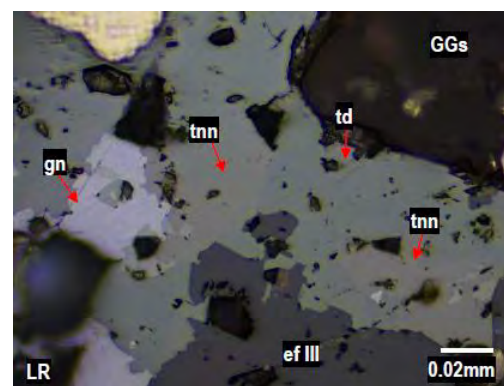
Esfalerita II (ef II) con exsoluciones de calcopirita III (cp III) asociado con la esfalerita III (ef III) reemplazando a la galena (gn) y calcopirita II (cp II) que están reemplazándose por cobres grises (CGRs). LR: Luz Reflejada.



Pirita (py) con intersticios rellenos por galena (gn) que es reemplazada por Cobres Grises (CGRs). LR: Luz Reflejada.



Agregados de tetradrita (td) intercrecida con Sulfosales de Plomo (SFsPb) que están reemplazando a la galena (gn). LR: Luz Reflejada.

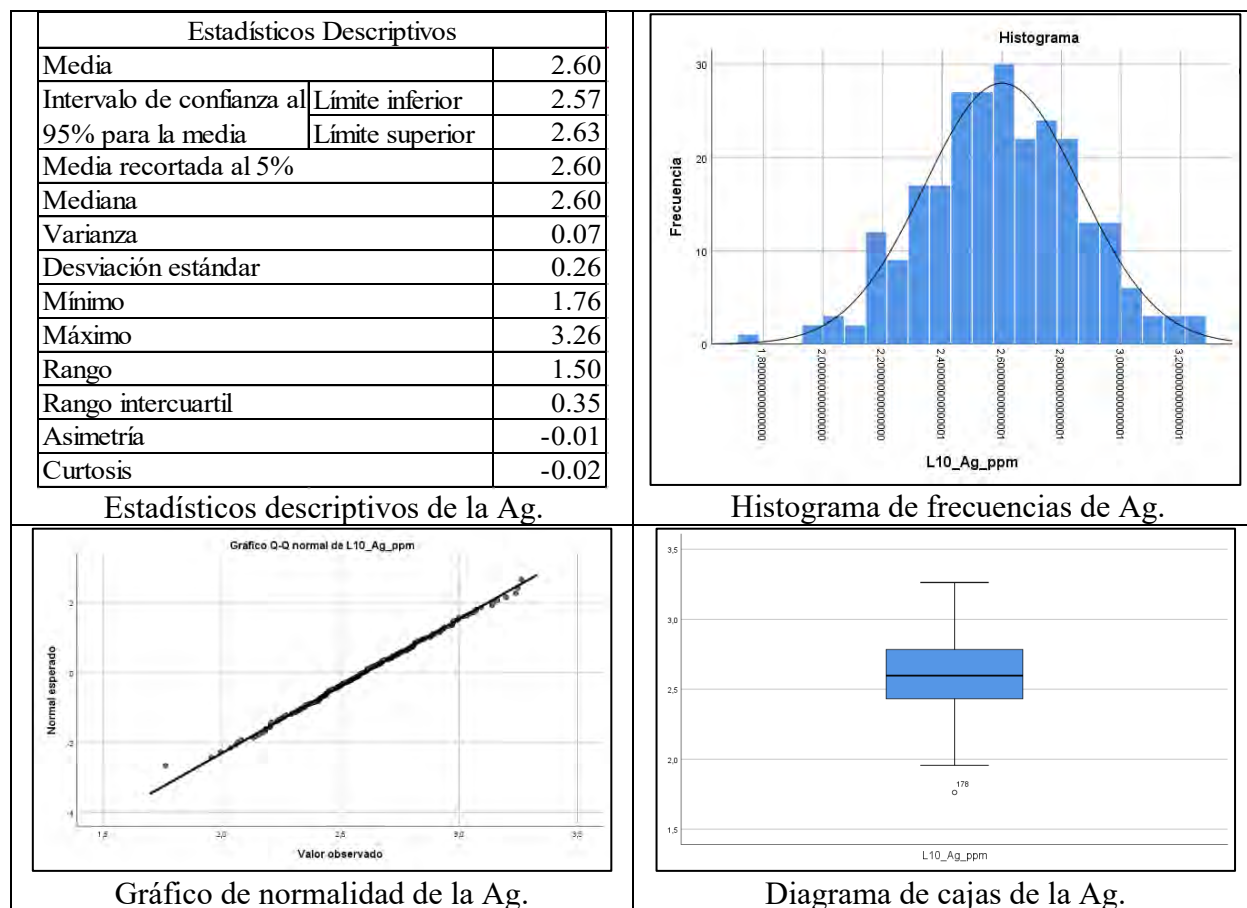


Esfalerita III (ef III) y galena (gn) reemplazada por tennantita (tnn) y tetradrita (td). LR: LR 0.02mm Luz Reflejada.

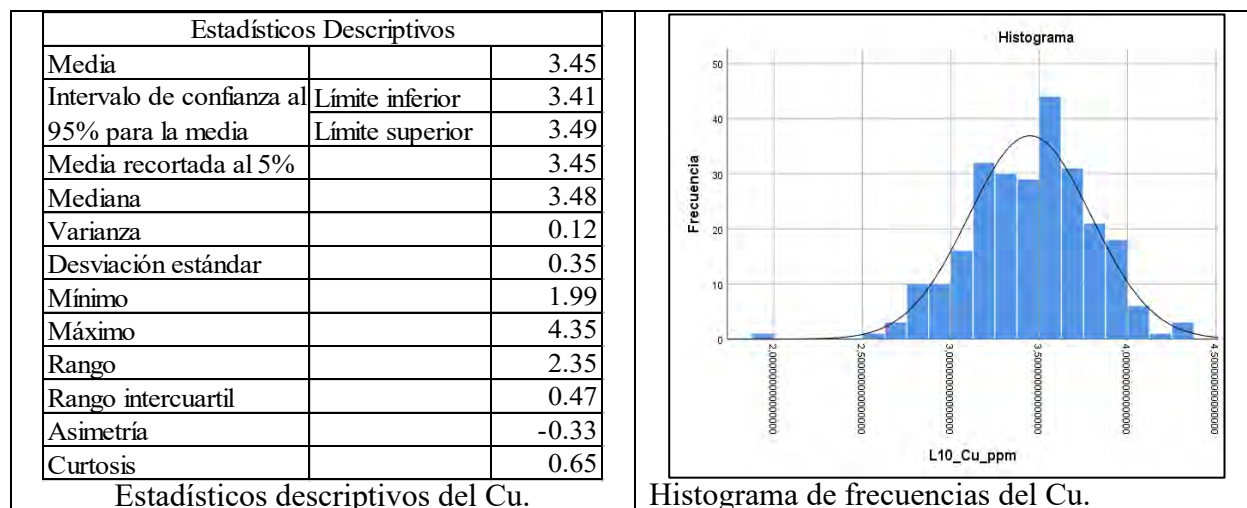
13.4. Anexo IV. Análisis exploratorio de datos

Análisis exploratorio de datos de la zona Sur

Análisis Estadístico de la Plata



Análisis Estadístico del Cobre



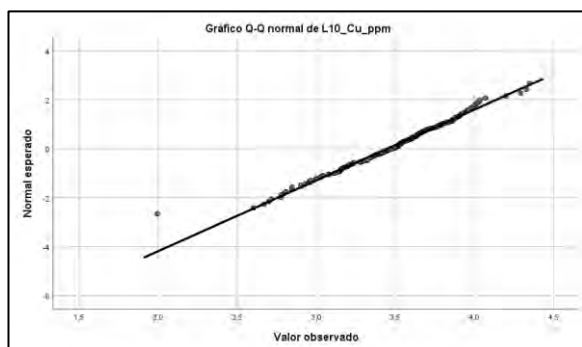


Gráfico de normalidad del Cu

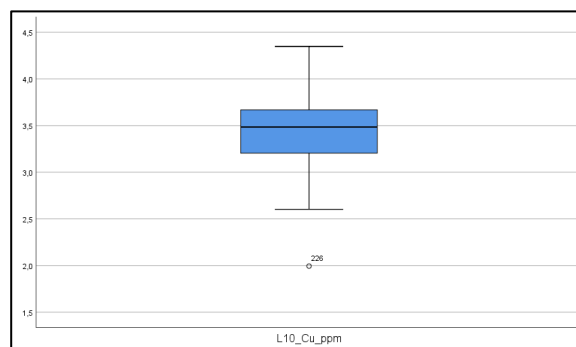
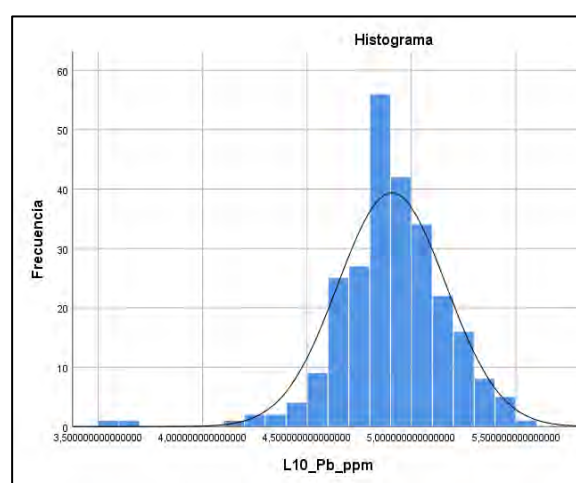


Diagrama de cajas del Cu.

Análisis Estadístico del Plomo

Estadísticos Descriptivos		
Media		4.91
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	4.87
	Límite superior	4.94
Media recortada al 5%		4.91
Mediana		4.90
Varianza		0.07
Desviación estándar		0.26
Mínimo		3.52
Máximo		5.56
Rango		2.04
Rango intercuartil		0.28
Asimetría		-1.02
Curtosis		4.60

Estadísticos descriptivos del Pb.



Histograma de frecuencias del Pb.

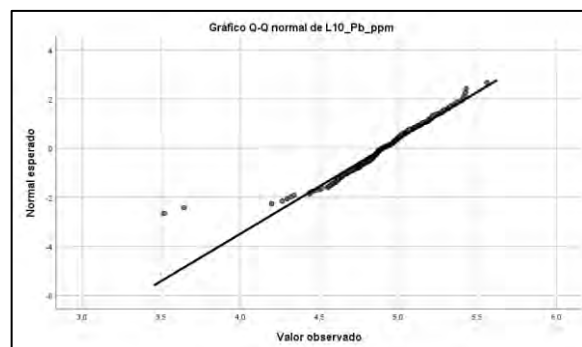


Gráfico de normalidad del Pb.

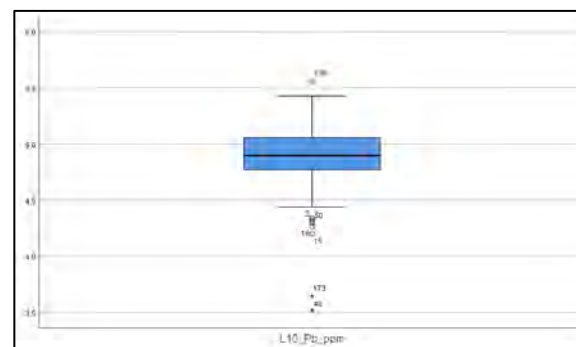
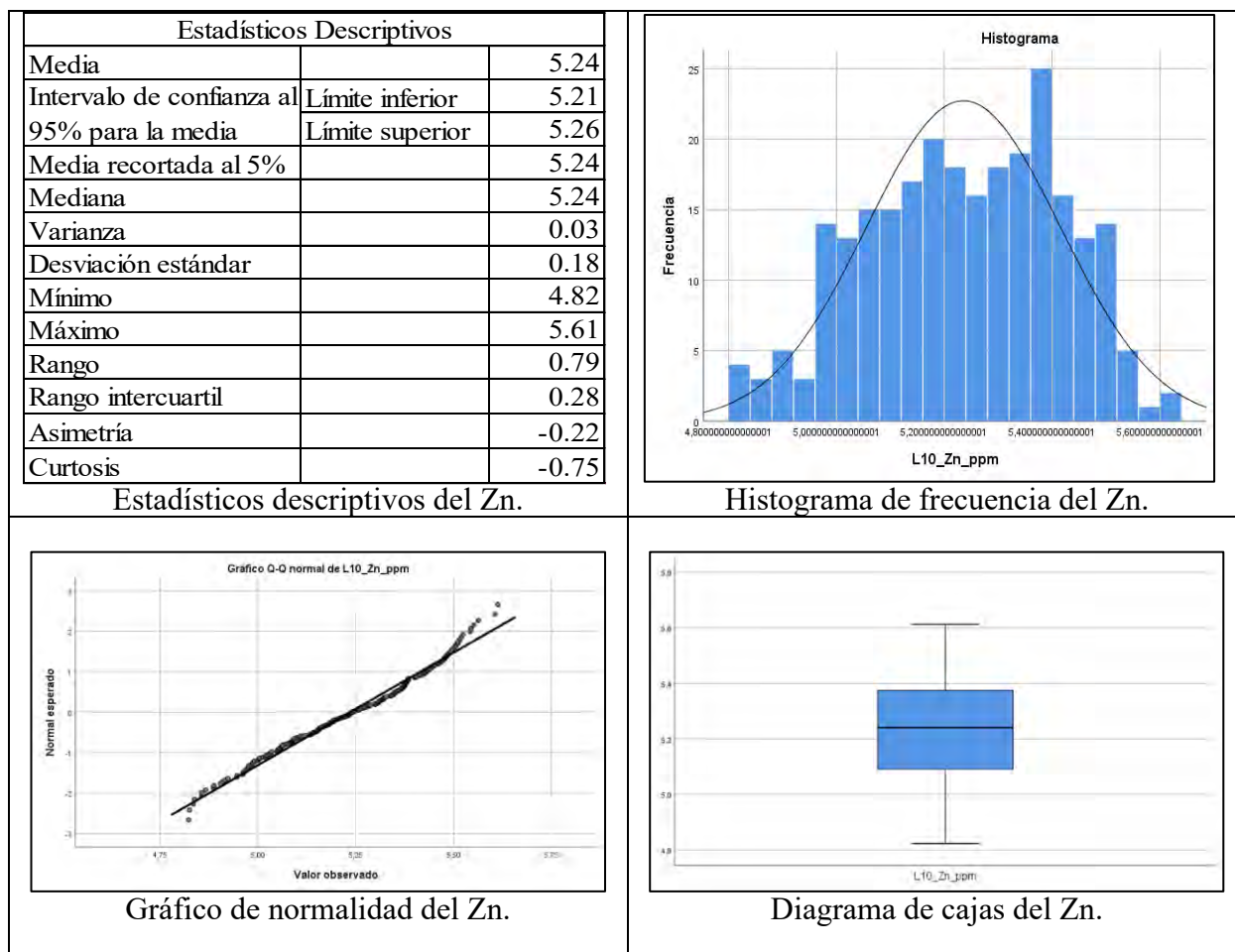


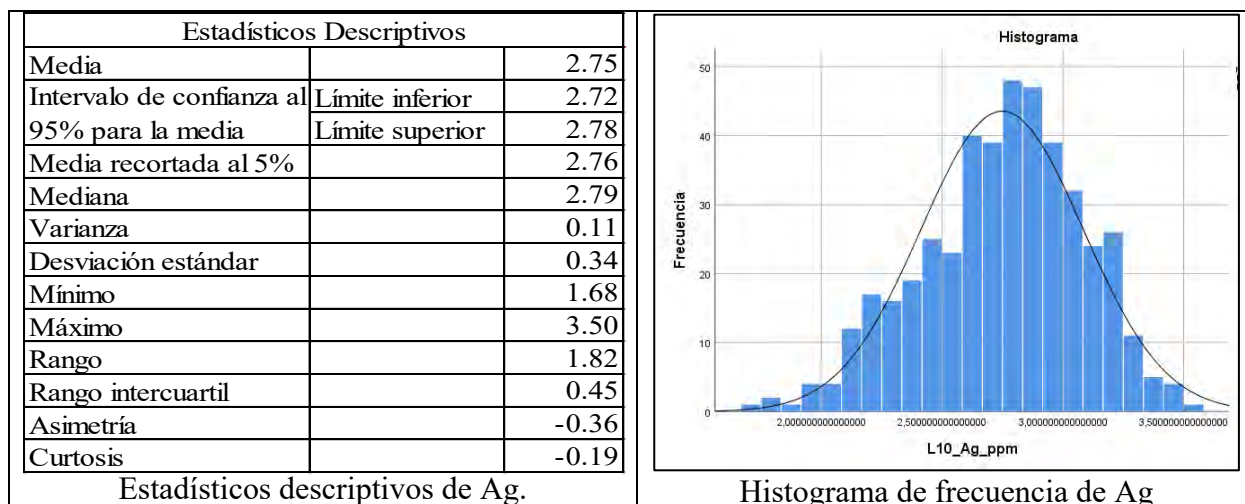
Diagrama de cajas del Pb.

Análisis Estadístico del Zinc



Análisis exploratorio de datos de la zona Centro

Análisis Estadístico de la Plata



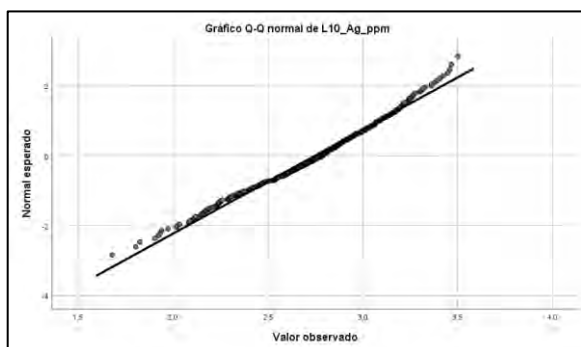


Gráfico de normalidad de la Ag zona Centro.

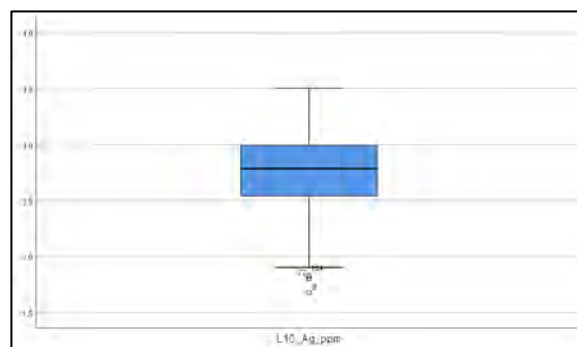
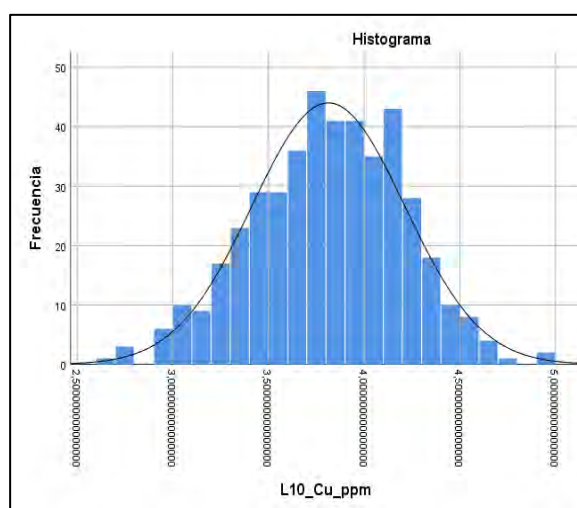


Diagrama de cajas de la Ag zona Centro.

Análisis Estadístico del Cobre

Estadísticos Descriptivos		
Media		3.81
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	3.78
	Límite superior	3.85
Media recortada al 5%		3.82
Mediana		3.83
Varianza		0.16
Desviación estándar		0.40
Mínimo		2.70
Máximo		4.99
Rango		2.29
Rango intercuartil		0.56
Asimetría		-0.18
Curtosis		-0.11

Estadísticos descriptivos del Cu.



Histograma de frecuencia Cu.

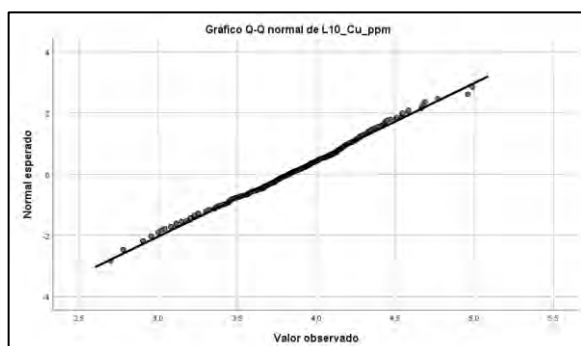


Gráfico de normalidad del Cu zona Centro.

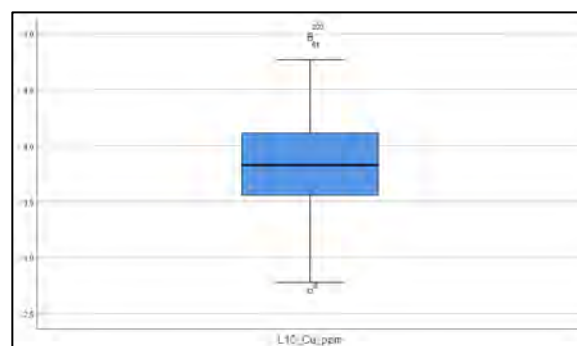
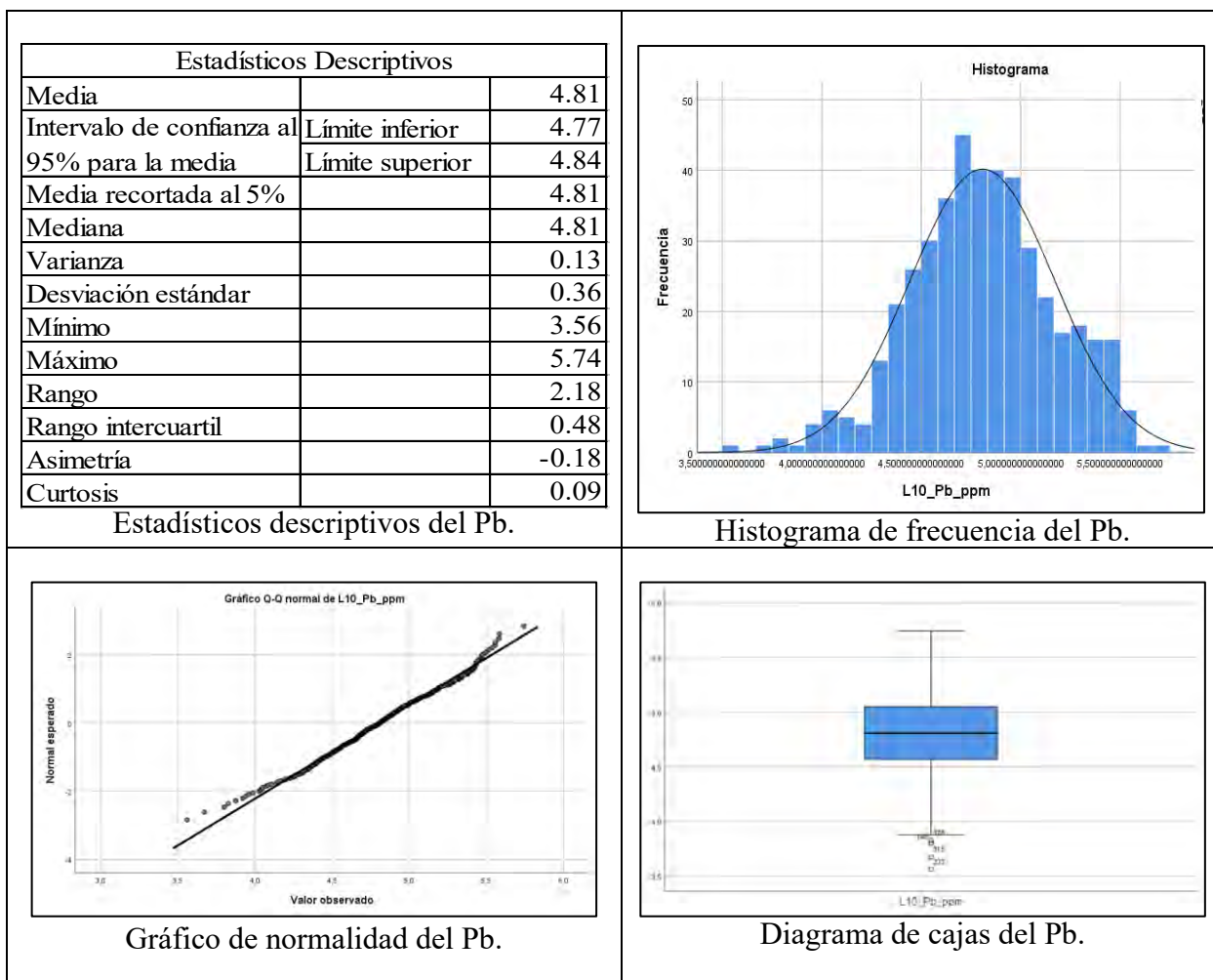
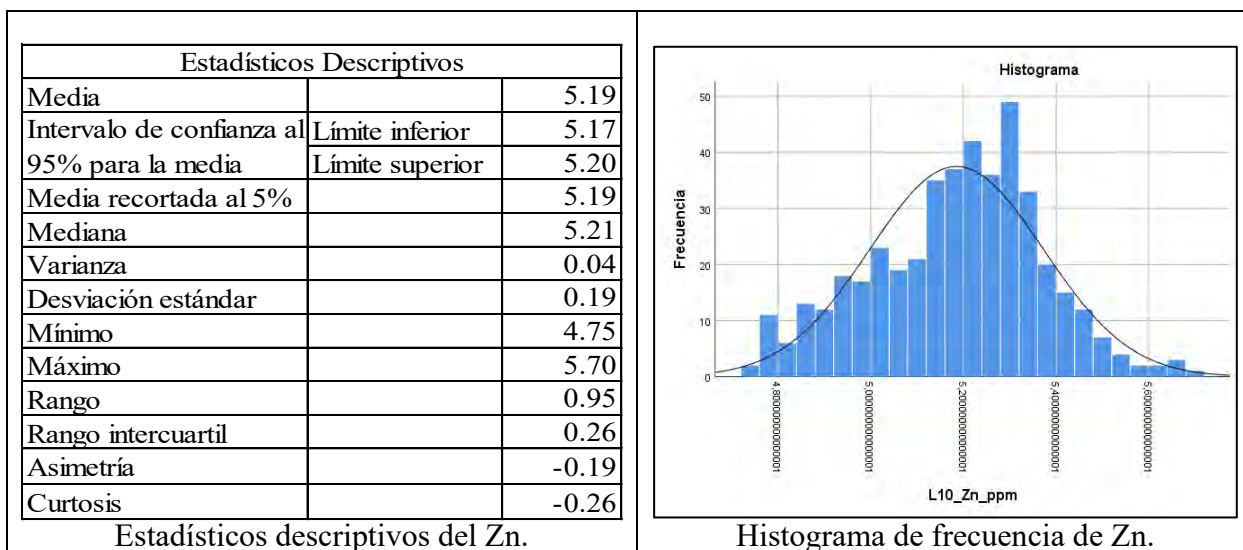


Diagrama de cajas del Cu zona Centro.

Análisis Estadístico del Plomo



Análisis Estadístico del Zinc



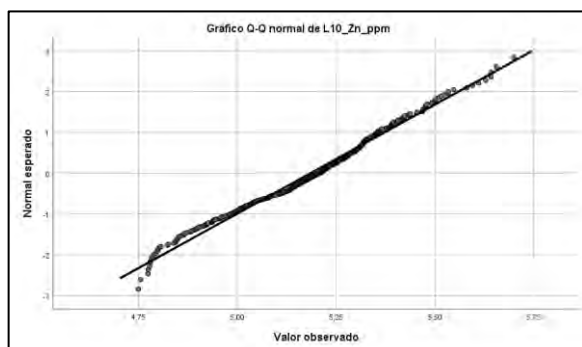


Gráfico de normalidad del Zn.

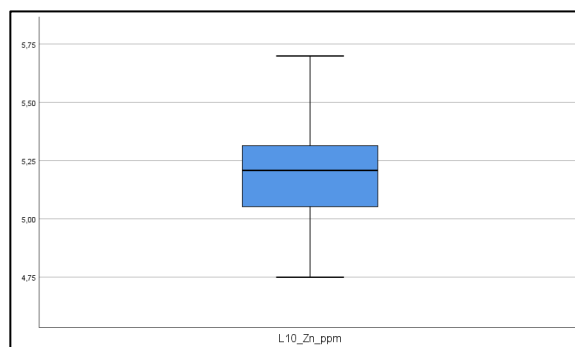


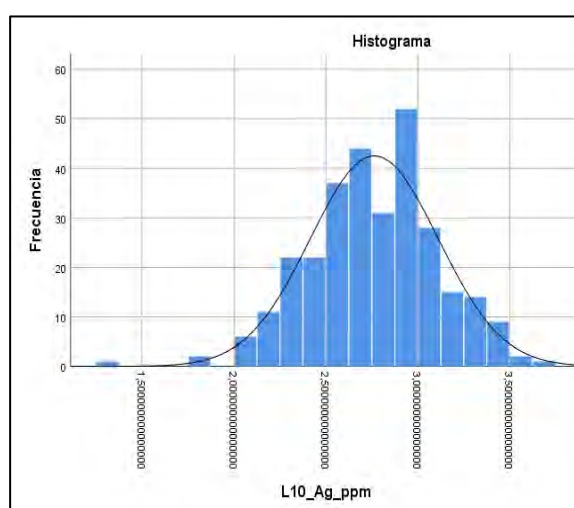
Diagrama de cajas del Zn zona.

Análisis exploratorio de datos de la zona Norte 1

Análisis Estadístico de la Plata

Estadísticos Descriptivos		
Media		2.76
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	2.72
	Límite superior	2.80
Media recortada al 5%		2.77
Mediana		2.78
Varianza		0.12
Desviación estándar		0.35
Mínimo		1.33
Máximo		3.63
Rango		2.30
Rango intercuartil		0.45
Asimetría		-0.25
Curtosis		0.45

Estadísticos descriptivos de la Ag.



Histograma de frecuencia de Ag.

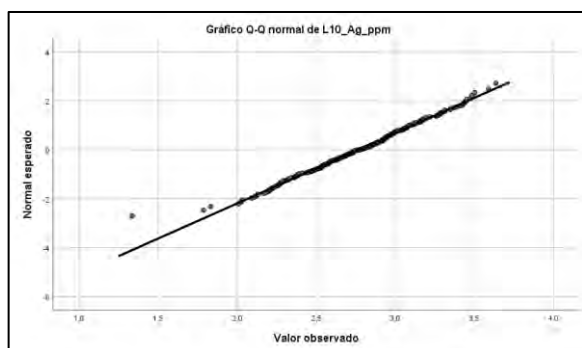


Gráfico de normalidad de la Ag.

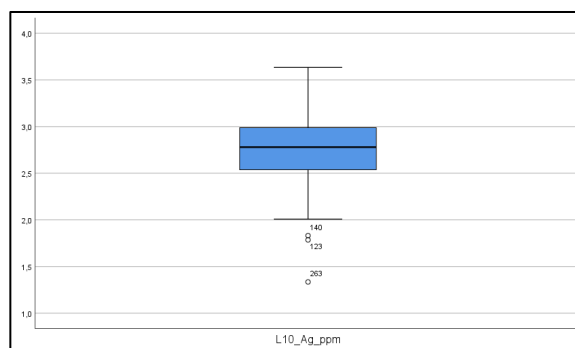
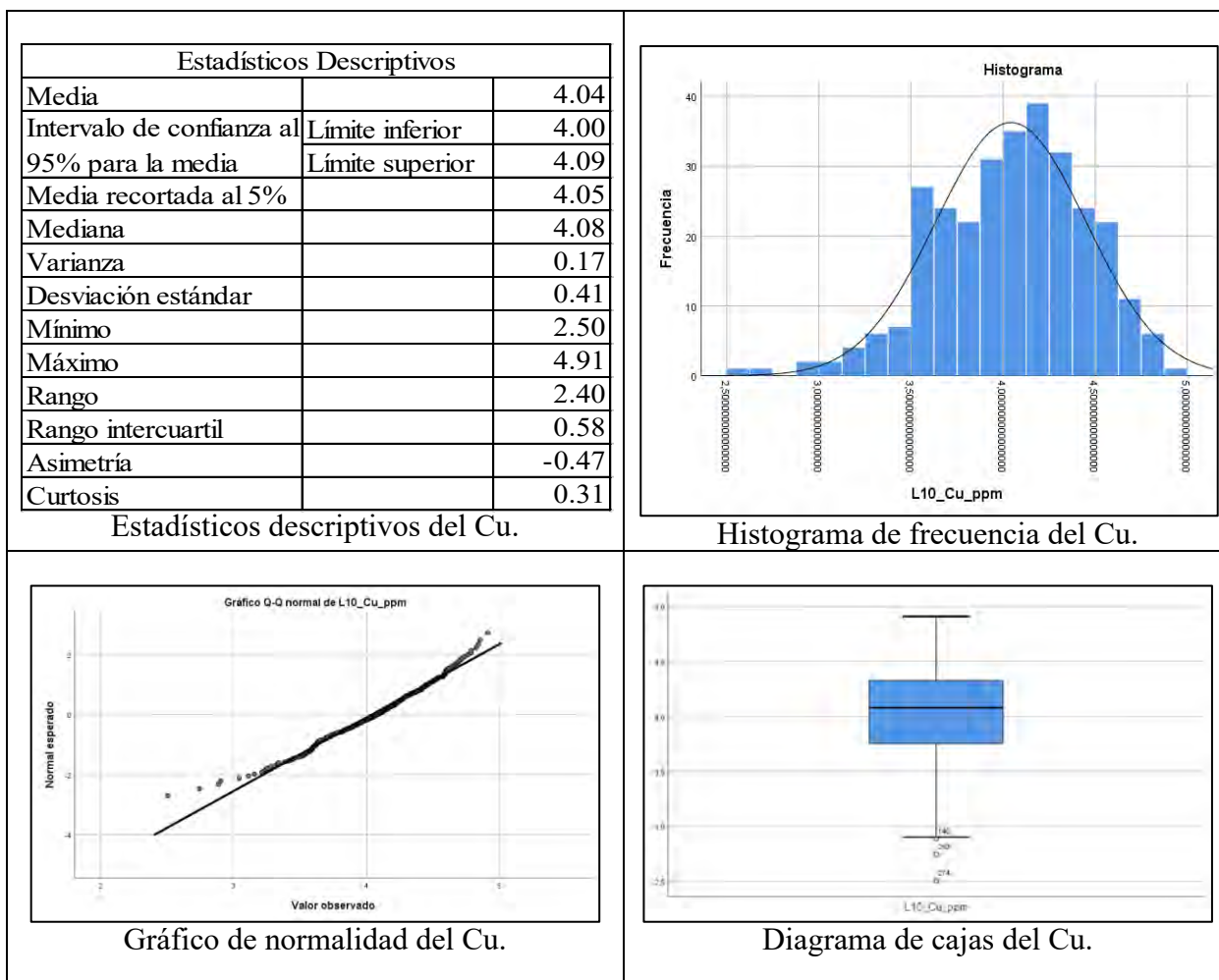
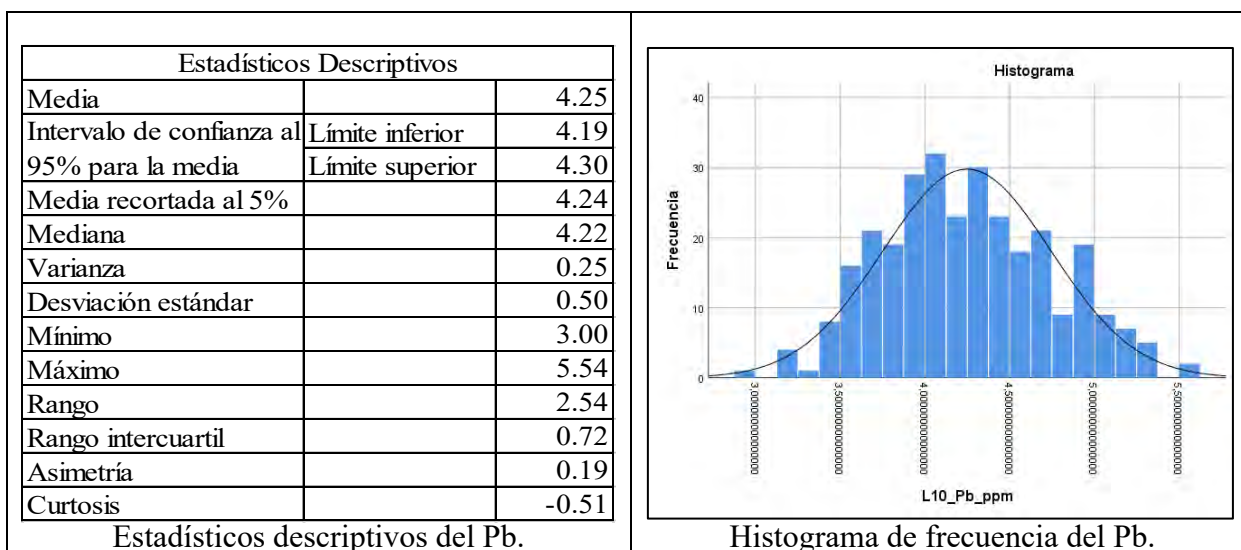


Diagrama de cajas de la Ag.

Análisis Estadístico del Cobre



Análisis Estadístico del Plomo



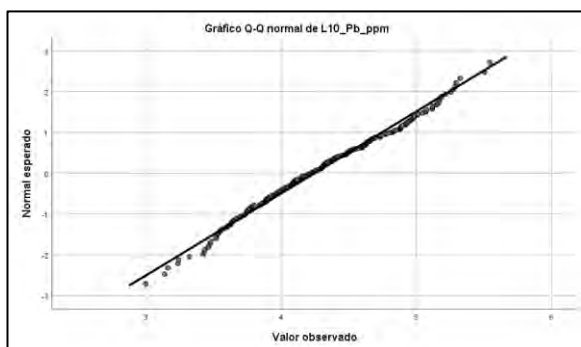


Gráfico de normalidad del Pb zona Norte 1.

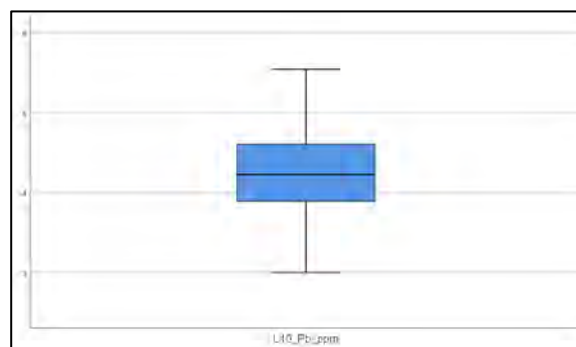
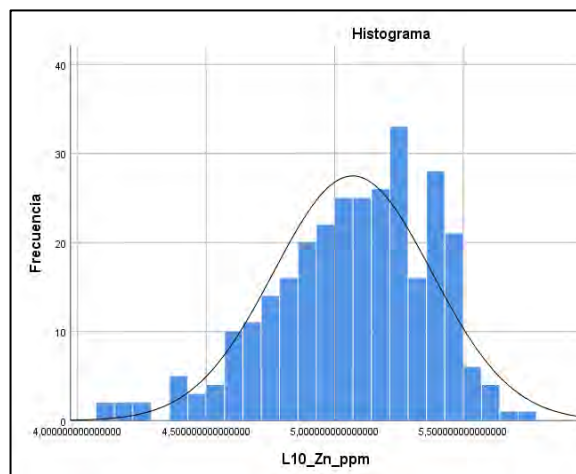


Diagrama de cajas del Pb zona Norte 1.

Análisis Estadístico del Zinc

Estadísticos Descriptivos		
Media		5.07
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	5.04
	Límite superior	5.11
Media recortada al 5%		5.08
Mediana		5.10
Varianza		0.09
Desviación estándar		0.31
Mínimo		4.13
Máximo		5.73
Rango		1.61
Rango intercuartil		0.43
Asimetría		-0.62
Curtosis		0.17

Estadísticos descriptivos del Zn.



Histograma de frecuencia del Zn.

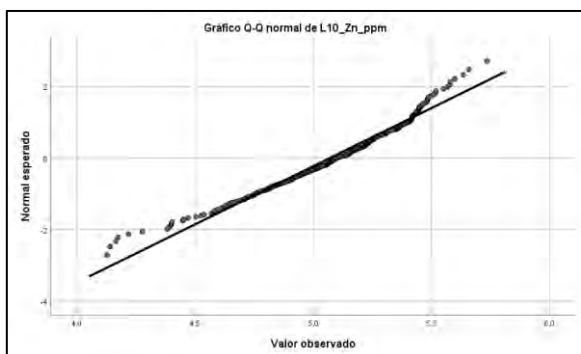


Gráfico de normalidad del Zn zona Norte 1

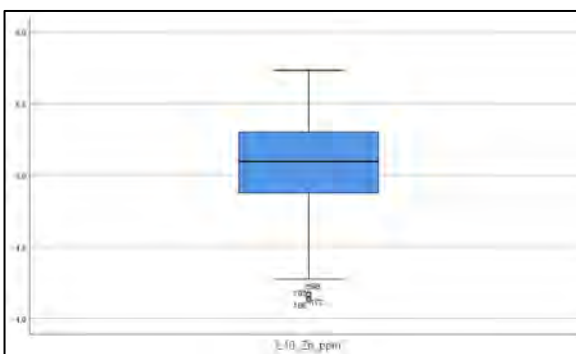


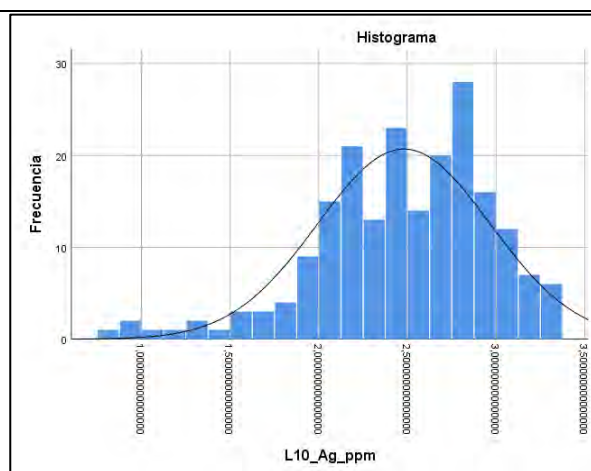
Diagrama de cajas del Zn zona Norte 1

Análisis exploratorio de datos de la zona Norte

Análisis Estadístico de la Plata

Estadísticos Descriptivos		
Media		2.48
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	2.41
	Límite superior	2.55
Media recortada al 5%		2.51
Mediana		2.52
Varianza		0.24
Desviación estándar		0.49
Mínimo		0.76
Máximo		3.32
Rango		2.56
Rango intercuartil		0.67
Asimetría		-0.80
Curtosis		0.92

Estadísticos descriptivos de la Ag.



Histograma de frecuencias de la Ag.

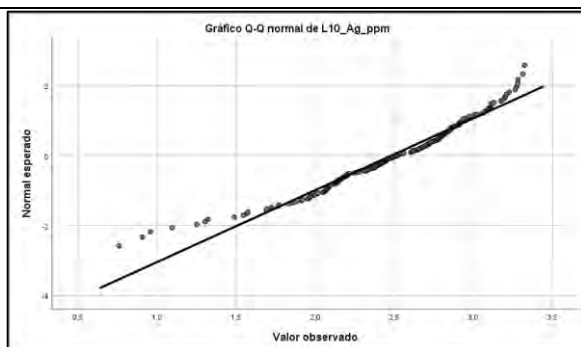


Gráfico de normalidad de la Ag zona Norte 2.

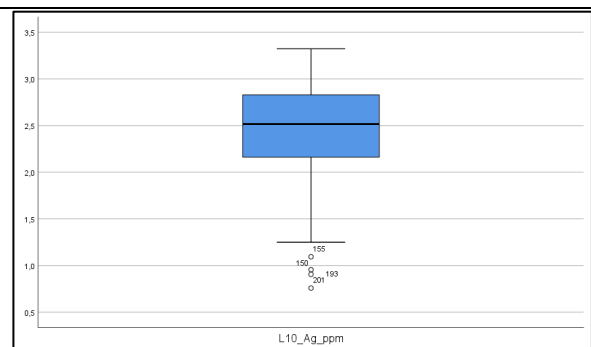
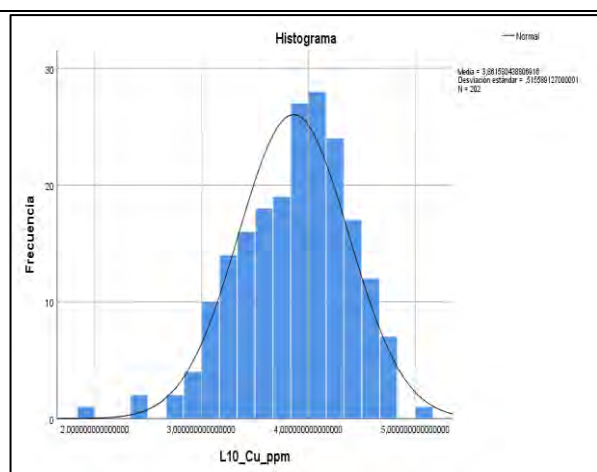


Diagrama de cajas de la Ag zona Norte 2.

Análisis Estadístico del Cobre

Estadísticos Descriptivos		
Media		3.86
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	3.79
	Límite superior	3.93
Media recortada al 5%		3.88
Mediana		3.93
Varianza		0.27
Desviación estándar		0.52
Mínimo		1.95
Máximo		5.16
Rango		3.20
Rango intercuartil		0.68
Asimetría		-0.53
Curtosis		0.36

Estadísticos descriptivos del Cu.



Histograma de frecuencia del Cu.

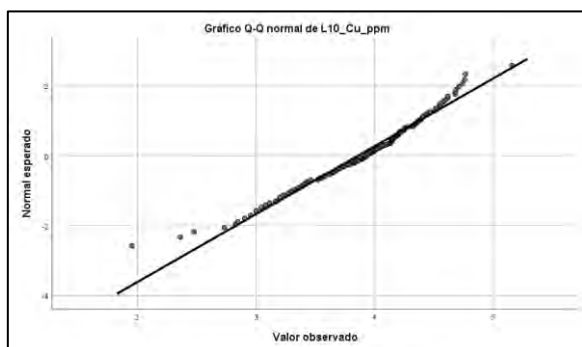


Gráfico de normalidad del Cu zona Norte 2.

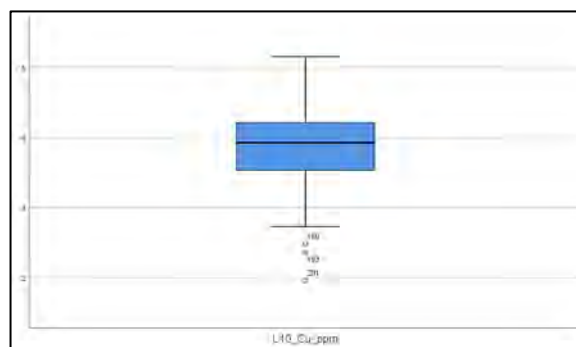
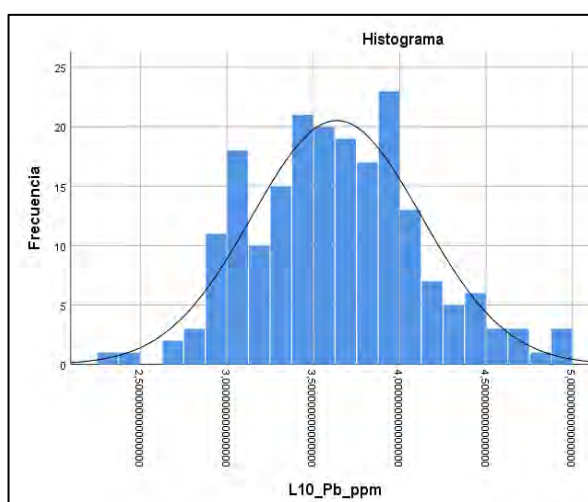


Diagrama de cajas del Cu zona Norte 2.

Análisis Estadístico del Plomo

Estadísticos Descriptivos		
Media		3.64
Intervalo de confianza al 95% para la media	Límite inferior	3.57
	Límite superior	3.70
Media recortada al 5%		3.63
Mediana		3.62
Varianza		0.24
Desviación estándar		0.49
Mínimo		2.34
Máximo		4.96
Rango		2.61
Rango intercuartil		0.63
Asimetría		0.23
Curtosis		-0.03

Estadísticos descriptivos del Pb zona Norte 2.



Histograma de frecuencias del Pb zona Norte 2.

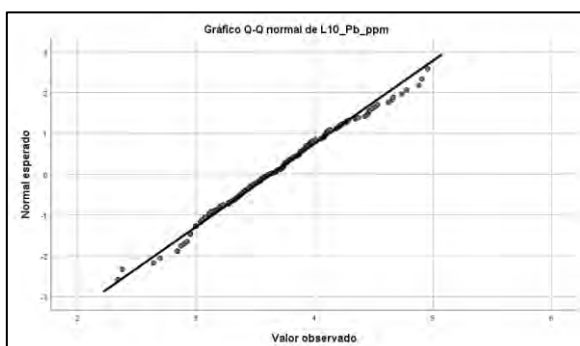


Gráfico de normalidad del Pb zona Norte 2.

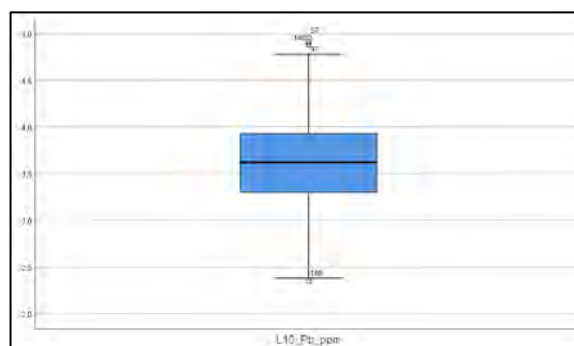


Diagrama de cajas del Pb zona Norte 2.

Análisis Estadístico del Zinc

