



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**“CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO AURÍFERO DE
OLLACHEA, MEDIANTE LA PETROMINERAGRAFIA,
ALTERACIONES HIDROTERMALES E INCLUSIONES
FLUIDAS.”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MIGUEL ANGEL COA TITO

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO - PERÚ

2019



NOMBRE DEL TRABAJO

**"CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO A
URÍFERO DE OLLACHEA, MEDIANTE LA
PETROMINERAGRAFIA, ALTERACIONES
HI**

AUTOR

MIGUEL ANGEL COA TITO

RECuento DE PALABRAS

31485 Words

RECuento DE CARACTERES

179962 Characters

RECuento DE PÁGINAS

220 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

55.5MB

FECHA DE ENTREGA

Apr 10, 2024 6:35 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Apr 10, 2024 6:38 AM GMT-5

● **18% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 1% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 18% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Asesor
Roberto Leguía Ponce


DIRECCION
INFORMACION
Dr. Rolando Apaza Campos
Director de la Unidad de Investigación
EPIG



DEDICATORIA

“Dedico este logro a Dios por haberme brindado la vida, por su guía y bendiciones que me han permitido alcanzar este objetivo. “

“Asimismo, dedico este logro con profundo cariño a mi padre, Sixto Coa, y a mi madre, Lola Tito. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para lograrlo.”

Miguel Angel Coa Tito



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a Dios, quien me ha guiado en cada etapa de mi carrera, y por haberme enseñado que "Todo lo puedo en Cristo que me fortalece" y que "Aunque ande en valle de sombra de muerte, no temeré mal alguno, porque Tú estarás conmigo; tu vara y tu cayado me infundirán aliento".

“A mis padres, Sixto Coa Quispe y Lola Belen Tito Tito, les agradezco por ser mi apoyo fundamental y por respaldarme en todo momento, a pesar de las dificultades que hemos enfrentado juntos. Agradezco también por los valores que me han inculcado desde temprana edad, por motivarme a ser un profesional íntegro y por ser ejemplos de trabajo y honestidad para asegurar el bienestar de nuestra familia.”

“A mis hermanos, David, Moisés y Juan Carlitos, les agradezco por sus palabras de aliento y por hacerme sentir orgulloso de ser su hermano mayor. También les agradezco por los años maravillosos que hemos compartido en nuestra infancia. En general, agradezco a toda mi familia por su apoyo incondicional en la consecución de este logro.”

“Asimismo, expreso mi gratitud a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, quienes han contribuido a mi formación profesional. Quiero destacar especialmente a mi director y asesor de tesis, el Ing. Roberto Zegarra Ponce, por su guía, experiencia y profesionalismo en el desarrollo de esta investigación.”

“De manera especial, agradezco al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) por permitir y facilitar el desarrollo de esta investigación. En particular, agradezco a mis compañeros y amigos de trabajo del Laboratorio de Petromineralogía de la Dirección de Laboratorios, especialmente a la Ing. Ana Luz Condorhuaman Suarez e Ing. Miguel Víctor Chumbe Salazar, por compartir su conocimiento, experiencia y guiarme en cada etapa de esta investigación.”

Miguel Angel Coa Tito



ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|-----------|
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTOS | |
| ÍNDICE GENERAL | |
| ÍNDICE DE TABLAS | |
| ÍNDICE DE FIGURAS | |
| ACRÓNIMOS | |
| RESUMEN | 19 |
| ABSTRACT..... | 20 |
| CAPITULO I | |
| INTRODUCCIÓN | |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 21 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 22 |
| 1.2.1. Definición del problema general | 22 |
| 1.2.2. Definición de los problemas específicos | 22 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN | 22 |
| 1.4. HIPÓTESIS | 24 |
| 1.4.1. General | 24 |
| 1.4.2. Hipótesis Específicas..... | 24 |
| 1.5. OBJETIVOS..... | 25 |
| 1.5.1. Objetivo General | 25 |
| 1.5.2. Objetivos Específicos..... | 25 |

CAPÍTULO II

REVISION DE LITERATURA



| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.1. | ANTECEDENTES | 26 |
| 2.2. | GEOLOGÍA REGIONAL..... | 30 |
| 2.2.1. | Paleozoico inferior: | 31 |
| 2.2.1.1. | Formación Sandía (os-sa)..... | 31 |
| 2.2.1.2. | Formación Ananea (Sd-A) | 32 |
| 2.2.2. | Paleozoico Superior..... | 33 |
| 2.2.2.1. | Grupo Mitu (Ps-Mi) | 33 |
| 2.2.3. | Cenozoico: Neogeno | 34 |
| 2.2.3.1. | Cuaternario | 34 |
| 2.2.4. | Rocas Intrusivas | 36 |
| 2.2.4.1. | Complejo de San Gabán (pt-mzg/gr) | 36 |
| 2.2.4.2. | Sienita Nefelinica (Jm-si)..... | 37 |
| 2.3. | GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL | 40 |
| 2.3.1. | Falla Paquillusi..... | 40 |
| 2.3.2. | Falla Ollachea..... | 41 |
| 2.3.3. | Falla Corani | 41 |
| 2.4. | YACIMIENTOS OROGÉNICOS..... | 41 |
| 2.4.1. | Terminología | 42 |
| 2.4.2. | Características geológicas regionales..... | 42 |
| 2.4.3. | Morfologías | 43 |
| 2.4.4. | Mineralogía de mena y ganga | 44 |
| 2.4.5. | Relaciones geométricas | 44 |
| 2.4.6. | Alteración Hidrotermal | 45 |
| 2.4.7. | Leyes y tonelajes | 46 |
| 2.4.8. | Geocronología | 46 |



| | |
|--|-----------|
| 2.4.9. Entorno geodinámico | 47 |
| 2.4.10. Características isotópicas: fuentes de fluidos y solutos | 48 |
| 2.4.11. Características de inclusiones fluidas..... | 49 |
| 2.4.12. Impacto ambiental | 50 |
| 2.4.13. Modelo genético..... | 50 |
| 2.5. INCLUSIONES FLUIDAS..... | 51 |
| 2.5.1. Clasificación de Inclusiones Fluidas | 52 |
| 2.5.1.1. Según su forma..... | 52 |
| 2.5.1.2. Según su contenido..... | 54 |
| 2.5.1.3. Según su origen | 58 |
| 2.5.2. Cambios Posteriores de las Inclusiones de Fluidos..... | 60 |
| 2.5.3. Sistemas de Fluidos de Interés | 63 |
| 2.5.3.1. Sistema H ₂ O | 63 |
| 2.5.3.2. Sistema H ₂ O-NaCl..... | 64 |
| 2.5.3.3. Sistema H ₂ O-CO ₂ | 66 |
| 2.5.3.4. Sistema H ₂ O-CO ₂ -NaCl | 68 |
| 2.5.4. Clatratos | 71 |
| 2.5.5. Inclusiones Fluidas en Exploración Minera | 72 |
| 2.5.6. Determinación de tipologías de depósitos minerales | 72 |
| 2.5.7. Identificación de temperaturas favorables a la presencia de mineralizaciones..... | 73 |
| 2.5.8. Identificación de canales de ascenso de fluidos | 74 |
| 2.5.9. Zonaciones composicionales..... | 75 |
| 2.5.10. Mecanismos de precipitación de metales: Ebullición | 76 |
| 2.5.11. Mecanismos de precipitación de metales Mezcla de fluidos | 79 |



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | | |
|-------------|---|------------|
| 3.1. | RECOPIACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 81 |
| 3.2. | ETAPA DE CAMPO | 83 |
| 3.3. | ETAPA DE LABORATORIO | 84 |
| 3.3.1. | Técnicas Analíticas | 84 |
| 3.3.1.1. | Microscopía óptica | 84 |
| 3.3.1.2. | Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) | 88 |
| 3.3.1.3. | Difracción de Rayos X..... | 89 |
| 3.3.1.4. | Espectroscopía de Reflectancia..... | 90 |
| 3.3.1.5. | Microtermometría..... | 91 |
| 3.3.2. | Metodología para el estudio de inclusiones fluidas | 93 |
| 3.3.2.1. | Estudio Petrográfico de Inclusiones Fluidas | 93 |
| 3.3.2.2. | Identificar las inclusiones fluidas según su origen..... | 95 |
| 3.3.2.3. | Desmontaje de la sección delgada doblemente pulida. | 96 |
| 3.3.2.4. | Fragmentación de la sección delgada doblemente pulida | 98 |
| 3.3.2.5. | Estudio microtermométrico de inclusiones fluidas | 98 |
| 3.3.2.6. | Medidas de temperaturas enfriamiento y calentamiento..... | 99 |
| 3.3.2.7. | Cálculo de la salinidad en el sistema H ₂ O-CO ₂ -NaCl..... | 101 |
| 3.3.2.8. | Cálculo de la densidad..... | 102 |
| 3.3.2.9. | Cálculo del % de CO ₂ : | 103 |
| 3.3.2.10. | Cálculo de la presión: | 104 |
| 3.3.2.11. | Diagramas para la interpretación de resultados..... | 106 |
| 3.4. | ETAPA DE INTERPRETACIÓN-GABINETE | 108 |



CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

| | |
|---|------------|
| 4.1. UBICACIÓN | 109 |
| 4.2. ACCESIBILIDAD | 109 |
| 4.3. FISIOGRAFIA | 110 |
| 4.4. HIDROGRAFÍA | 111 |
| 4.5. GEOMORFOLOGÍA | 112 |
| 4.6. GEOLOGÍA LOCAL | 113 |
| 4.6.1. Paleozoico Inferior: Formación Sandia (Os-S)..... | 115 |
| 4.6.2. Paleozoico Inferior: Formación Ananea (Sd-A) | 115 |
| 4.6.3. Grupo Mitu (Ps-Mi) | 116 |
| 4.6.4. Cuaternario: Coluvial (Q-Co)..... | 117 |
| 4.6.5. Intrusivo: Complejo De San Gaban (Pt-Mzg/Gr) | 117 |
| 4.6.6. Intrusivo: Sienita Nefelinica (Jm-Si)..... | 118 |

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|---|------------|
| 5.1. CARACTERIZACIÓN PETROMINERAGRÁFICA POR UNIDADES ESTRATIGRAFICAS | 120 |
| 5.1.1. Muestra: LP16-048..... | 121 |
| 5.1.2. Muestra: LP16- 049..... | 124 |
| 5.1.3. Muestra: LP16-52..... | 129 |
| 5.1.4. Muestra: LP16-53..... | 132 |
| 5.1.5. Muestra: LP16-45..... | 134 |
| 5.1.6. Muestra: LP16-47..... | 138 |
| 5.1.7. Muestra: LP16-50..... | 142 |



| | |
|---|------------|
| 5.1.8. Muestra: LP16-51..... | 145 |
| 5.1.9. Muestra: LP16-55..... | 148 |
| 5.1.10. Muestra: LP16-46..... | 151 |
| 5.1.11. Muestra: LP16-54..... | 154 |
| 5.2. ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS..... | 158 |
| 5.2.1. Muestra: LP16-IF-MC01..... | 159 |
| 5.2.1.1. Estudio Petromineragráfico..... | 161 |
| 5.2.1.2. Petrografía de inclusiones fluidas | 164 |
| 5.2.1.3. Análisis Microtermométrico | 166 |
| 5.2.1.4. Alteración Hidrotermal | 168 |
| 5.2.1.5. Estudio por Microscopia Electrónica de Barrido(MEB)..... | 169 |
| 5.2.2. Muestra: LP16-IF-MC02..... | 170 |
| 5.2.2.1. Estudio Petromineragráfico..... | 173 |
| 5.2.2.2. Estudio Petrográfico de inclusiones fluidas | 177 |
| 5.2.2.3. Análisis microtermométrico de inclusiones fluidas | 178 |
| 5.2.2.4. Estudio de alteraciones hidrotermales..... | 179 |
| 5.2.2.5. Estudio por Microscopia Electrónica de Barrido(MEB)..... | 180 |
| 5.2.3. Muestra: LP16-IF-MC04..... | 182 |
| 5.2.3.1. Estudio Petromineragráfico..... | 185 |
| 5.2.3.2. Estudio Petrográfico de Inclusiones Fluidas | 186 |
| 5.2.3.3. Estudio Microtermométrico de Inclusiones Fluidas..... | 187 |
| 5.2.3.4. Estudio de alteraciones hidrotermales..... | 189 |
| 5.3. CÁLCULOS MICROTERMOMETRICOS | 190 |
| 5.3.1. Resumen del estudio de inclusiones fluidas | 190 |
| 5.3.2. Salinidad..... | 191 |



| | |
|---|------------|
| 5.3.3. Densidad del fluido mineralizante..... | 192 |
| 5.3.4. Presión de atrapamiento de las inclusiones fluidas | 194 |
| 5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 194 |
| 5.4.1. Evolución del fluido mineralizante | 195 |
| 5.4.2. Tipología del yacimiento aurífero de Ollachea | 200 |
| 5.4.3. Análisis de inclusiones fluidas de CO ₂ | 201 |
| 5.4.4. Relación entre las inclusiones fluidas y la mineralización de oro..... | 204 |
| VI. CONCLUSIONES | 209 |
| VII. RECOMENDACIONES | 210 |
| VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 211 |
| IX. WEBGRAFÍAS..... | 214 |
| X. ANEXOS | 220 |

Área: Geología de Minas

Tema: Yacimientos Minerales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de noviembre del 2019



ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Columna estratigrafía regional..... | 39 |
| Tabla 2 Propiedades ópticas de los “minerales hijos”. | 57 |
| Tabla 3 Temperatura del punto eutéctico para diversos sistemas salinos-acuosos (a 1 atm). | 66 |
| Tabla 4 Vías de acceso al área de estudio. | 109 |
| Tabla 5 Muestras analizadas por unidad estratigráfica. | 120 |
| Tabla 6 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-048... | 123 |
| Tabla 7 Composición mineralógica por DRX - muestra LP16-48..... | 124 |
| Tabla 8 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-49.... | 127 |
| Tabla 9 Composición mineragráfica de la muestra LP16-049..... | 128 |
| Tabla 10 Composición mineralógica por DRX. Muestra LP16-49..... | 129 |
| Tabla 11 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-52.... | 131 |
| Tabla 12 Composición mineralógica por DRX. Muestra LP16-52..... | 132 |
| Tabla 13 Composición mineralógica por microscopia óptica.Muestra LP16-53..... | 134 |
| Tabla 14 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-45.... | 136 |
| Tabla 15 Composición mineralógica por DRX. Muestra LP16-45..... | 137 |
| Tabla 16 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-47.... | 141 |
| Tabla 17 Composición mineragráfica de la muestra LP16-047..... | 142 |
| Tabla 18 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-50.... | 145 |
| Tabla 19 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-51.... | 147 |
| Tabla 20 Composición mineralógica por DRX. Muestra LP16-51..... | 148 |
| Tabla 21 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-55.... | 150 |
| Tabla 22 Composición mineralógica por microscopia óptica. Muestra LP16-46.... | 154 |



| | | |
|-----------------|---|------------|
| Tabla 23 | Composición mineralógica por microscopía óptica. Muestra LP16-54..... | 156 |
| Tabla 24 | Composición mineralógica por DRX. Muestra LP16-54..... | 157 |
| Tabla 25 | Características petrográficas de inclusiones fluidas-Muestra LP16-IF-MC01. | 164 |
| Tabla 26 | Características petrográficas de inclusiones fluidas-Muestra LP16-IF-MC02. | 177 |
| Tabla 27 | Características petrográficas de inclusiones fluidas-Muestra LP16-IF-MC03. | 186 |
| Tabla 28 | Resumen de las características del estudio de inclusiones fluidas..... | 190 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-----------|
| Figura 1 Depósitos minerales epigenéticos ricos en oro | 43 |
| Figura 2 Inclusiones fluidas | 52 |
| Figura 3 Morfología de inclusiones fluidas..... | 53 |
| Figura 4 Morfología de inclusiones fluidas..... | 55 |
| Figura 5 Tipos de inclusiones fluidas..... | 56 |
| Figura 6 Disposición de inclusiones fluidas de origen primario. | 59 |
| Figura 7 Esquema de las inclusiones fluidas primarias (p), secundarias (s) y pseudosecundarias (ps). | 60 |
| Figura 8 Esquema de los fenómenos de stretching y leakage. | 62 |
| Figura 9 Proceso de Necking down a partir de una inclusión tabular | 62 |
| Figura 10 Diagrama P-T del sistema H ₂ O. | 64 |
| Figura 11 Diagrama T-X para el sistema H ₂ O-NaCl..... | 65 |
| Figura 12 Diagrama P-T para el sistema CO ₂ | 67 |
| Figura 13 Evolución de fases en función de la temperatura en el sistema H ₂ O-NaCl-CO ₂ | 70 |
| Figura 14 Bosquejo de clatratos. | 71 |
| Figura 15 Ejemplo de diagrama de clasificación de yacimientos | 73 |
| Figura 16 Isotermas construidos a partir de las temperaturas de homogeneización. ... | 75 |
| Figura 17 Ejemplo de zonación composicional para inclusiones con CO ₂ | 76 |
| Figura 18 Ensamble de inclusiones fluidas mostrando ebullición. | 77 |
| Figura 19 Texturas de calcita y sílice en depósitos epitermales..... | 79 |
| Figura 20 Microscopio petrográfico de luz transmitida y reflejada, Leica DM 2500P. | 85 |
| Figura 21 Partes externas e internas del MEB, marca Zeiss Evo MA15. | 88 |



| | | |
|------------------|--|------------|
| Figura 22 | Difractómetro Shimadzu | 90 |
| Figura 23 | Equipo de espectroscopia modelo TerraSpec HI-RES 4. Marca ASD | 91 |
| Figura 24 | Equipo de inclusiones fluidas | 92 |
| Figura 25 | Cambios de fase en una inclusión con H ₂ O-CO ₂ -NaCl durante la microtermometría..... | 101 |
| Figura 26 | Gráfico para hallar la salinidad. | 102 |
| Figura 27 | Diagrama para determinar la presión de inclusiones fluidos con CO ₂ | 104 |
| Figura 28 | Variación de los solvi en el sistema H ₂ O-CO ₂ -NaCl..... | 105 |
| Figura 29 | Diagrama P-T para el sistema H ₂ O-CO ₂ con isocoras calculadas para el fluido CO ₂ y el líquido acuoso. | 106 |
| Figura 30 | Diagrama para la interpretación de población de datos de inclusiones fluidas. | 107 |
| Figura 31 | Tipologías de yacimientos. | 108 |
| Figura 32 | Mapa de ubicación. | 110 |
| Figura 33 | Valles tipo “V” al Noreste de Ollachea, en la zona de Sayapiya. | 111 |
| Figura 34 | Sistema montañoso de pendientes abruptas que caracteriza las zonas altas de Ollachea. | 113 |
| Figura 35 | Vista de la formación Ananea y Sandia, interceptados por el complejo San Gaban, con presencia de anticlinas y sinclinales. | 114 |
| Figura 36 | Afloramiento de la Formación Ananea en el valle del río Oscocachi, en la zona de Cuncurayoc y Minapampa. | 116 |
| Figura 37 | Afloramiento de la Sienita Nefelinica, en la zona de Ccollpapampa..... | 118 |
| Figura 38 | Afloramiento de esquistos de la formación Sandia, en el cerro Ccoloyoc-Jupuna. | 121 |
| Figura 39 | Difractograma de la muestra LP16- 048..... | 123 |
| Figura 40 | Afloramiento, zona de contacto entre la Formación Ananea y Sandia, puestos en evidencia por la falla Paquellusi..... | 125 |
| Figura 41 | Ocurrencia de mineralización de cobre en la Formación Sandia. | 125 |



| | | |
|------------------|---|------------|
| Figura 42 | Difractograma de la muestra LP16-049. Formación Sandia..... | 128 |
| Figura 43 | Afloramiento de esquistos micáceos de la formación Sandia, en la zona de Muyucpampa. Muestra de mano (LP16-052). | 130 |
| Figura 44 | Difractograma de la muestra LP16-052. Formación Sandia..... | 132 |
| Figura 45 | Afloramiento de la Formación Sandia en la zona de Challouno, presenta cobertura coluvial. Muestra de mano LP16-53..... | 133 |
| Figura 46 | Afloramiento de pizarras en la formación Ananea, en la zona de Jupuna-Chullu. Muestra de mano LP16-45..... | 135 |
| Figura 47 | Difractograma de la muestra LP16-45. Formación Ananea. | 137 |
| Figura 48 | Afloramiento de areniscas de grano fino de la formación Ananea, en la zona de Ccollpapampa-Jupuna. Muestra de mano LP16-47. | 139 |
| Figura 49 | Punto de muestreo de la formación Ananea en la zona de Cuncurayoc, en el margen derecho del río Oscocachi. Muestra de mano LP16-50. | 143 |
| Figura 50 | Afloramiento del contacto entre la formación Sandia y Ananea, expuesto por la falla Ollachea, en la parte alta del sector Challouno, cercano al cerro Lanlacu.Muestra de mano LP16-51. | 145 |
| Figura 51 | Difractograma de la muestra LP16-51. Formación Sandia-zona de Lanlacu. | 148 |
| Figura 52 | Afloramiento del Grupo Mitu en cercanías al puente San Francisco-Ollachea. | 149 |
| Figura 53 | Cantos rodados de granodiorita en la zona de Jupuna-Chullu y Cuncurayoc. | 152 |
| Figura 54 | Muestra de mano del complejo San Gaban. LP16-46..... | 152 |
| Figura 55 | Zona de contacto entre la formación Ananea y el intrusivo de sienita nefelinica, cortados por el río Ollachea. | 155 |
| Figura 56 | Difractograma de la muestra LP16-54. Intrusivo Sienita Nefelinica. | 157 |
| Figura 57 | Puntos de muestreo para el estudio de Inclusiones Fluidas. | 159 |
| Figura 58 | Veta de cuarzo asociado a sulfuros, con dirección paralela a la foliación de la roca, en zona de Minapampa..... | 160 |



| | | |
|------------------|---|------------|
| Figura 59 | Muestra de mano y sección delgada doblemente pulida de la muestra LP16-IF-MC01. | 161 |
| Figura 60 | Temperatura de fusión de clatratos-Temperatura de homogeneización del CO2. | 166 |
| Figura 61 | Salinidad y temperatura de homogeneización total. | 166 |
| Figura 62 | Temperatura de homogeneización total vs salinidad. | 167 |
| Figura 63 | Temperatura de fusión del CO2- Temperatura de homogeneización total. | 168 |
| Figura 64 | Difractograma de la muestra LP16-IF-MC01. | 168 |
| Figura 65 | Área analizada en la roca caja, junto a firmas espectrales elementales. | 169 |
| Figura 66 | Análisis puntual por MEB de oxidos en la misma zona. | 170 |
| Figura 67 | Análisis elemental y puntual del espectro número 6 y 8. | 170 |
| Figura 68 | Punto de muestreo en Cuncurayoc, en la formación Ananea. Muestra LP16-IF-MC02. | 171 |
| Figura 69 | Muestra de mano y sección delgada doblemente pulida. Muestra LP16-IF-MC02. | 172 |
| Figura 70 | Histogramas para temperaturas de fusión y temperatura de homogeneización de CO2. | 178 |
| Figura 71 | Histograma de temperatura de homogeneización total. | 179 |
| Figura 72 | Difractogramas de la muestra LP16-IF-MC02. | 180 |
| Figura 73 | Análisis de oro por MEB. | 181 |
| Figura 74 | Afloramiento de pizarras de la formación Ananea, en la zona de Balcon. | 183 |
| Figura 75 | Punto de muestreo en la zona de Balcon, formación Ananea. | 183 |
| Figura 76 | Muestra de mano y sección delgada doblemente pulida. Muestra LP16-IF-MC04. | 184 |
| Figura 77 | Histogramas de fusión del CO2. | 187 |
| Figura 78 | Histograma de fusión del CO2. | 188 |
| Figura 79 | Histograma de Th total. | 188 |



| | |
|---|------------|
| Figura 80 Gráfico de dispersión de Th total vs salinidad de la muestra LP16-IF-MC04. | 189 |
| Figura 81 Difractogramas de la muestra LP16-IF-MC04. | 190 |
| Figura 82 Cálculo de la salinidad a partir de la temperatura de fusión del CO ₂ | 191 |
| Figura 83 Cálculo para la densidad de Inclusiones Fluidas con CO ₂ | 192 |
| Figura 84 Cálculo de la presión de atrapamiento de las Inclusiones fluidas. | 194 |
| Figura 85 Dispersión de Temperatura de homogeneización total en relación con la salinidad. | 195 |
| Figura 86 Temperatura de homogeneización vs salinidad en muestra LP16-IF-MC01... | 197 |
| Figura 87 Temperatura de homogeneización vs salinidad en muestra LP16-IF-MC04... | 198 |
| Figura 88 Ploteo de datos de Inclusiones Fluidas para el yacimiento de Ollachea, en el diagrama de Wilkinson (2001)..... | 200 |
| Figura 89 Histograma de Th total para el CO ₂ | 201 |
| Figura 90 Histograma de temperatura de fusión del CO ₂ | 202 |
| Figura 91 Cálculo del porcentaje de CO ₂ y CH ₄ , según la temperatura de fusión vs homogeneización del CO ₂ | 203 |
| Figura 92 Solubilidad y transporte del oro. | 208 |



ACRÓNIMOS

| | |
|---------------------|--|
| INGEMMET | Instituto Geológico Minero y Metalúrgico |
| MEB | Microscopia Electrónica de Barrido |
| FILL | Grado de relleno respecto a la fase vapor |
| IF-MON | Inclusiones fluidas monofásicas |
| IF-BIF | Inclusiones fluidas bifásicas |
| IF | Inclusiones Fluidas |
| FIF | Familia de inclusiones fluidas |
| L, V, S | Fase Líquida |
| LP | Laboratorio de Petromineralogía |
| EDS | Detector de Energía Dispersa |
| IFP, IFS, IFPS | Inclusiones fluidas Primarias, Secundarias, Pseudosecundarias. |
| D.D.P. | Sección delgada doblemente pulida |
| Tf clatr. | Temperatura de fusión de clatratos |
| Tf CO ₂ | Temperatura de fusión del CO ₂ |
| ThCO ₂ | Temperatura de homogeneización del CO ₂ |
| Th | Temperatura de homogeneización |
| Tf H ₂ O | Temperatura de fusión del hielo |
| TT | Temperatura de atrapamiento/Captura |
| DRX | Difracción de rayos X |
| Th total | Temperatura de homogeneización total (CO ₂ +H ₂ O) |
| VNIR | Región del Visible-Infrarrojo Cercano VNIR (380-1300nm) |
| SWIR | Infrarrojo de onda corta |



RESUMEN

El Yacimiento de Ollachea, ubicado en el distrito del mismo nombre en la provincia de Carabaya, región de Puno, se encuentra al Este de la Cordillera Oriental. Este estudio tuvo como objetivo analizar las características petrográficas, minerográficas y las alteraciones hidrotermales del área, así como investigar las inclusiones de fluidos. Se utilizó una metodología descriptiva y explicativa, recolectando un total de 11 muestras de roca de los alrededores del yacimiento y 03 muestras de vetas de cuarzo mineralizadas con oro nativo y sulfuros de las zonas de Cuncurayoc, Minapampa y Balcón. La litología del área incluye pizarras, esquistos micáceos, metagranodioritas, areniscas, pizarra moteada, sienita nefelínica y andesita porfirítica. Las estructuras predominantes son vetas de cuarzo alojadas en pizarras bituminosas, con mineralización económica de oro nativo asociado a calcopirita, pirrotita, pirita, arsenopirita y esfalerita en las fracturas del cuarzo. Las alteraciones observadas son leves e incluyen silicificación, cloritización, sericitización y carbonatación. Se realizaron análisis microtermométricos en 101 inclusiones fluidas primarias, regularmente bifásicas y vaporosas, pertenecientes al sistema complejo carbónico-acuoso ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}\pm\text{CH}_4$) en un contexto orogénico. Las temperaturas de homogeneización oscilan entre 285°C y 400°C , con salinidades de 1 a 12% wt.NaCl eq, densidades del fluido de 0.85 a 1.07g/cm^3 y presiones de atrapamiento de 500 a 1500 bares. Estas inclusiones ricas en CO_2 están relacionadas con la mineralización de oro nativo, debido al efecto neutralizante del CO_2 en el fluido mineralizante, lo que aumenta la solubilidad del oro junto con los complejos sulfurados.

Palabras Clave: Petrografía, Inclusiones fluidas, Microtermometría, Yacimientos orogénicos.



ABSTRACT

The Ollachea deposit, located in the district of the same name in the province of Carabaya, Puno region, is located east of the Eastern Cordillera. The objective of this study was to analyze the petrographic, mineragraphic and hydrothermal alteration characteristics of the area, as well as to investigate fluid inclusions. A descriptive and explanatory methodology was used, collecting a total of 11 rock samples from the surroundings of the deposit and 03 samples of quartz veins mineralized with native gold and sulfides from the Cuncurayoc, Minapampa and Balcón areas. The lithology of the area includes shales, micaceous schists, metagranodiorites, sandstones, mottled shale, nepheline syenite and porphyritic andesite. The predominant structures are quartz veins hosted in bituminous shales, with economic mineralization of native gold associated with chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite, arsenopyrite and sphalerite in quartz fractures. The alterations observed are mild and include silicification, chloritization, sericitization and carbonation. Microthermometric analyses were performed on 101 primary fluid inclusions, regularly biphasic and vaporous, belonging to the carbonaceous-aqueous complex system (CO₂-H₂O-NaCl±CH₄) in an orogenic context. Homogenization temperatures range from 285°C to 400°C, with salinities of 1 to 12% wt.NaCl eq, fluid densities of 0.85 to 1.07g/cm³ and trapping pressures of 500 to 1500 bar. These CO₂-rich inclusions are related to native gold mineralization due to the neutralizing effect of CO₂ in the mineralizing fluid, which increases the solubility of gold along with sulfide complexes.

Keywords: Petrography, Fluid inclusions, Microthermometry, Orogenic reservoirs.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El depósito de oro de Ollachea está situado en metasedimentos carbonáceos que datan de la era Devónica, ubicados al este de la Cordillera Oriental de los Andes. La mineralización se presenta en forma de vetas con una dirección hacia el oeste y un ángulo de inclinación hacia el norte. La ley promedio de oro es de 2.0 g/t, y se estima que hay reservas de aproximadamente 1 millón de onzas de oro en la zona de Mina Pampa, según los estudios de exploración realizados por Minera Kuri Kullu S.A., una subsidiaria de Minera IRL Ltd.

La formación del yacimiento de Ollachea se ha investigado principalmente a través de observaciones de campo y análisis de muestras obtenidas mediante perforaciones diamantinas de hasta 400 metros de profundidad. Sin embargo, al revisar la bibliografía sobre la zona, se evidencia una escasez de información detallada sobre estudios petrominerográficos de la mineralogía del depósito, las alteraciones hidrotermales y la mineralización económica. Además, no se han realizado estudios de inclusiones fluidas, las cuales son cruciales para comprender los mecanismos de mineralización, debido a la falta de esfuerzos dirigidos a comprender su origen, transporte y deposición a través de técnicas analíticas de laboratorio.

La ausencia de información sobre las inclusiones fluidas ha limitado la comprensión de los procesos de mineralización de oro en el yacimiento de Ollachea. Estas inclusiones son testigos directos de la circulación del fluido mineralizante y son fundamentales para interpretar los mecanismos de formación del depósito. Es crucial



entender sus características para explicar la mineralización de oro, especialmente considerando que el origen de este tipo de yacimientos sigue siendo objeto de debate.

Se sugiere que los fluidos responsables de la mineralización podrían haber sido generados por metamorfismo prógrado, posiblemente asociado con aureolas de contacto con intrusiones, lo que desencadenaría reacciones de deshidratación. Sin embargo, estas teorías aún están sujetas a debate y requieren una investigación más profunda para ser validadas.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Definición del problema general

¿Cuáles son las características petromineralógicas, alteraciones hidrotermales y de las inclusiones de fluidos del yacimiento aurífero de Ollachea?

1.2.2. Definición de los problemas específicos

¿Qué características petrográficas y mineragráficas presenta el yacimiento aurífero de Ollachea?

¿Qué características presentan las inclusiones fluidas y las alteraciones hidrotermales del yacimiento aurífero de Ollachea?

¿Cuáles son las características del fluido mineralizante y sus implicancias en la mineralización del yacimiento aurífero de Ollachea?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Es crucial y esencial investigar en profundidad la ocurrencia, evolución y distribución del yacimiento aurífero de Ollachea, el cual es un tipo de depósito orogénico



alojado en metasedimentos. Este yacimiento, que pertenece al grupo de los depósitos con mayor tonelaje a nivel mundial, superando significativamente a los pórfidos y otros tipos de yacimientos, genera reservas de oro que exceden las 500 toneladas métricas. Por lo tanto, es fundamental llevar a cabo un estudio exhaustivo para caracterizar su composición petromineralógica y analizar las inclusiones fluidas presentes en las estructuras mineralizadas.

La realización de este estudio proporciona un entendimiento detallado de la mineralización económica y las características de las inclusiones fluidas, incluyendo temperaturas y presiones mínimas de atrapamiento, densidad y salinidad del fluido mineralizador. Además, permite describir la posible relación entre estas características y la mineralización de oro. Con esta información, se podrían desarrollar herramientas o directrices para la exploración de yacimientos orogénicos, con el objetivo de aumentar las reservas de oro tanto en el depósito de Ollachea como en la franja metalogénica N° III.

Este enfoque también proporcionaría una mayor certeza en la identificación de vetas de cuarzo con potencial aurífero, lo que ayudaría a delimitar áreas de exploración y optimizar el desarrollo de la mina. Además, contribuiría a evitar impactos ambientales negativos al evitar excavaciones sin un criterio adecuado, lo que podría resultar en grandes cantidades de desmonte y la generación de aguas ácidas.

En la actualidad, la información geológica del yacimiento de Ollachea se basa principalmente en observaciones de campo, con un limitado análisis de laboratorio. Este trabajo proporcionará datos nuevos y significativos mediante el análisis mineralógico y del fluido mineralizante utilizando técnicas de laboratorio de última generación, como microscopía, espectrometría, microscopía electrónica de barrido y microtermometría.



Estos análisis serán fundamentales para entender mejor la génesis de estos yacimientos y establecerán una base sólida para investigaciones futuras.

La aplicación de estas técnicas permitirá definir pautas y procedimientos para el estudio de inclusiones de fluidos, lo que será de gran utilidad para la investigación de otros tipos de yacimientos minerales. Es importante destacar que la mineralización de ganga en el depósito de Ollachea consiste principalmente en cuarzo, lo que lo convierte en un candidato ideal para estudios de inclusiones fluidas debido a la transparencia de este mineral.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. General

A medida que los análisis petrográficos, mineralógicos, de alteraciones hidrotermales y de inclusiones de fluidos revelen indicios microscópicos positivos para describir el yacimiento aurífero de Ollachea, se podrá clasificar con precisión este yacimiento como de tipo orogénico y entender su influencia en la mineralización de oro.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- Los análisis petrográficos y minerográficos serán fundamentales para determinar la composición litológica tanto de la roca caja como de las rocas adyacentes, así como para identificar la presencia de la mineralización económica en el yacimiento.
- Las inclusiones fluidas encontradas en el yacimiento a nivel global se caracterizan por ser acuosas-carbónicas, con una alta concentración de CO₂ y



temperaturas de homogeneización por debajo de los 400 °C, además de presentar salinidades bajas. Estas inclusiones están asociadas principalmente con una alteración leve de la roca caja.

- Las propiedades de los fluidos mineralizantes, como su salinidad, temperatura y el contenido elevado de CO₂, tienen implicaciones significativas en la formación de depósitos de oro en un contexto orogénico.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Determinar las características petrográficas, mineragráficas, alteraciones hidrotermales y de las inclusiones fluidas del yacimiento aurífero de Ollachea.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características petrográficas y mineragráficas del yacimiento aurífero de Ollachea.
- Realizar el estudio de inclusiones fluidas y la microtermometría, además de estudiar las alteraciones hidrotermales del yacimiento aurífero de Ollachea.
- Determinar las características del fluido mineralizante y sus implicancias en la mineralización de oro del yacimiento aurífero de Ollachea.



1.1. CAPÍTULO II

REVISION DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Goldfarb et al. (2001) afirman en su estudio "Oro orogénico y tiempo geológico: una síntesis global" que el patrón de las edades de oro orogénico a lo largo del tiempo geológico no es aleatorio; en su lugar, generalmente se correlaciona con eventos térmicos asociados al crecimiento de nueva corteza continental. La migración de fluidos a gran escala a lo largo de las estructuras principales, profundamente arraigadas, es parte de la mayoría de las orogenias, con temperaturas moderadas a altas ($\geq 400-500^{\circ}\text{C}$) que alcanzan la corteza terrestre.

Valencia y Villareal (2009) señalan en el proyecto "Geología Económica y Metalogénica del Perú" que en el Sureste del país se encuentran depósitos de oro con características típicas de tipo orogénico, como los de Ollachea, Untuca, Rinconada y Ananea. La génesis de estos depósitos está vinculada a la acción de fluidos provenientes de eventos termales sin-orogénicos, los cuales fueron movilizados a lo largo de márgenes continentales activos. Durante la diagénesis y compactación, ocurridas en estos márgenes, se produjo una posterior removilización por sistemas hidrotermales convectivos hacia estructuras favorables, en el contexto de eventos orogénicos.

Valencia et al. (2011) en su estudio "Mineralización y geoquímica de los depósitos de la cordillera oriental del sureste peruano", sostienen que la Cordillera Oriental del sur del Perú se habría situado en una zona de depósitos orogénicos de oro. Esto se debería a la reactivación de mineralizaciones previas causada por la superposición de eventos



tectónicos que provocaron metamorfismo regional. Según su investigación, en esta área no habría habido una actividad ígnea significativa.

Valdivieso (2011) señala en su investigación "Exploración de yacimientos de oro orogénico de la franja Ollachea-La Rinconada" que estos depósitos se formaron durante eventos asociados con la orogénesis Hercínica (250-300 MA) en el Paleozoico inferior, específicamente durante el período Devónico-Pérmico. Además, menciona que los fluidos metamórficos con mineralización de oro y metales base se encuentran asociados con alteraciones de sericita y carbonatos en ambientes compresivos. Posteriormente, ocurrieron eventos tecto-orogénicos que provocaron la removilización y reconcentración de sulfuros auríferos, los cuales estarían relacionados con cuerpos plutónicos intermedios que, en última instancia, serían la fuente de los fluidos con mineralización de oro.

Vilca (2012) en su estudio titulado "Comportamiento estructural de la formación Ananea en la zona del proyecto Ollachea", concluye que en la región existen dos sistemas de fallamiento distintos. Uno de estos sistemas está asociado con esfuerzos de compresión con una orientación predominante de 320° , mientras que el otro sistema está relacionado con esfuerzos distensivos con una orientación predominante de 50° .

Valencia et al. (2013), en su estudio titulado "Nuevos alcances sobre la mineralización de Au-Sn-U en la Cordillera Oriental del Sureste Peruano", llegan a la conclusión de que la franja aurífera está asociada con depósitos de tipo orogénico, originados por procesos metamórficos regionales. Estos procesos metamórficos fueron responsables de la actividad termal que condujo a la removilización y mineralización del oro.

Luque (2013), en su estudio "Características geológicas, anomalías geoquímicas y geofísicas del proyecto Ollachea", determina que el yacimiento es de tipo oro orogénico.



La mineralización de oro se originó a partir de la acción de fluidos hidrotermales (mesotermiales) que se aprovecharon de las fracturas subparalelas con cuarzo y sulfuros de zinc, hierro, plomo, cobre y arsénico.

Bodnar et al. (2014) indican en su trabajo "Inclusiones fluidas en depósitos minerales hidrotermales" que las temperaturas de homogeneización de las inclusiones fluidas acuosas y acuosas-carbónicas en depósitos de oro orogénico oscilan aproximadamente entre 150 y 350°C. Estos depósitos suelen contener inclusiones fluidas ricas en CO₂ (carbónicas) con cantidades mínimas o nulas de H₂O, y las temperaturas de homogeneización de estas inclusiones carbónicas varían entre aproximadamente -50°C y 30°C. Las salinidades de las inclusiones fluidas acuosas son típicamente de 0 a 10 wt% NaCl eq, aunque en algunos depósitos pueden encontrarse inclusiones con salinidades más altas de hasta 40% NaCl (\pm CaCl₂). Las concentraciones de CO₂ en las inclusiones fluidas acuosas suelen estar en el rango de 4 a 25 mol%, aunque pueden presentarse concentraciones mayores de CO₂.

McIver et al. (2014) llevó a cabo la "Caracterización geoquímica de la mineralización aurífera del yacimiento Orogénico Ollachea en la Cordillera Oriental-Sureste del Perú", donde concluye que el depósito mineral de Ollachea corresponde a "Oro Orogénico en Shear Zone", ubicado dentro de la Formación Ananea y limitado al sur por la falla Paquillusi y al norte por la falla de cizalla Ollachea. La presencia de oro se encuentra en formas libre, diseminada y en microvenas de cuarzo gris y blanquecino deformado, con la presencia de sulfuros (aproximadamente 3%) y una geometría de tipo manto irregular. Además, señalan que el arsénico es el único y principal indicador para la exploración de oro en el área de estudio.



Goldfarb et al. (2015) en su estudio "Oro orogénico: fuentes de fluido y de metales comunes o en evolución a través del tiempo", concluyen que los depósitos de oro orogénico de todas las edades, desde la era paleoarcaica hasta el Terciario, muestran una consistencia en su composición química. Estos depósitos son el resultado de la acción de fluidos acuosos-carbónicos, que típicamente contienen entre un 5% y un 20% en moles de CO₂, aunque en algunos casos la desmezcla durante fluctuaciones extremas de presión puede resultar en la formación de inclusiones fluidas mucho más ricas en CO₂. Los fluidos mineralizantes suelen caracterizarse por la presencia de concentraciones significativas de CH₄ y/o N₂, con estimaciones comunes de 0,01% a 0,36% en moles de H₂S, un pH de 5,5 y salinidades que oscilan entre 3% y 7% en peso de NaCl eq, con una dominancia de Na>K>>Ca, Mg.

En la actualidad, la fase de exploración del yacimiento aurífero de Ollachea ha sido completada por Minera IRL Limited, una empresa latinoamericana especializada en la extracción de metales preciosos, especialmente oro. Esta compañía obtuvo una opción sobre el proyecto Ollachea a través de su subsidiaria Kury Kullu S.A.C., que llevó a cabo las labores de exploración desde 2008 hasta 2016. Durante este período, se ha evidenciado un considerable potencial de expansión de las reservas y los recursos minerales. En el segundo trimestre de 2014, se finalizó un estudio de optimización basado en el estudio definitivo de factibilidad realizado en 2012, destacando la viabilidad de una operación minera subterránea sólida y de bajo costo. A fines de marzo de 2013, se concluyó la construcción de un túnel de exploración de 1.2 kilómetros de longitud, el cual fue aprovechado para llevar a cabo un programa de perforación diamantina en el extremo este de Minapampa. Este programa generó aproximadamente 5200 metros de perforación, completándose en el cuarto trimestre de 2016. Los resultados indicaron una continuación de la mineralización de oro en Minapampa, extendiéndose 500 metros al este de la reserva



mineral existente, y sugiriendo la posibilidad de una extensión tanto en dirección como en profundidad.

Kury Kullu S.A.C. (2012) firmó un acuerdo de derechos de superficie por un período de 30 años. Como parte de este acuerdo a largo plazo, la Comunidad de Ollachea recibirá el 5% de las utilidades de la mina una vez que comience la producción comercial. Además, la compañía ha obtenido las autorizaciones ambientales, sociales y de construcción necesarias por parte del gobierno para avanzar en el desarrollo futuro de la Mina de Oro Ollachea.

2.2. **GEOLOGÍA REGIONAL**

En el área de investigación se encuentran exposiciones de rocas que abarcan desde el Paleozoico inferior hasta el Cenozoico, ubicadas en el sur de la cordillera de los Andes. Predominan las rocas sedimentarias con un grado leve de metamorfismo regional, que albergan yacimientos vetiformes con mineralización de oro. La estratigrafía está representada por la Formación Sandía y Ananea, que se extienden desde el sistema Ordovícico Superior hasta el Devónico del Paleozoico inferior, respectivamente. Estas formaciones consisten principalmente en areniscas finas, lutitas negras y lutitas negras pizarrosas con siltitas, según lo señalado por Chavez A. (1997). Además, estas exposiciones se extienden por vastas áreas de la cordillera Oriental, desde el Noroeste de Bolivia hasta la cordillera de Vilcabamba en el Perú.

Durante un extenso período de tiempo geológico, desde el Paleozoico inferior hasta el Cretácico, estas exposiciones fueron afectadas por la actividad tectónica, experimentando una sucesión de esfuerzos compresivos y distensivos. Esto dio lugar a la formación de zonas de cizallamiento intensas, plegamientos y fracturamientos. Además,



estas exposiciones fueron interceptadas por intrusiones plutónicas de diversas edades, lo que provocó metamorfismo de contacto en algunas áreas.

2.2.1. Paleozoico inferior:

2.2.1.1. Formación Sandia (os-sa)

Laubacher G. (1978) fue el pionero en identificar esta formación en el valle del río Sandia, la cual se expone de manera continua en una franja en el flanco noreste de la Cordillera Oriental del Sur del Perú.

De acuerdo con Chávez A. (1997), la formación muestra una litología dominada por pizarras, cuarzoarenitas y siltitas, con un espesor estratigráfico aproximado de 1500 metros. Se encuentra en contacto con la Formación Ananea debido a la presencia de una falla inversa de alto ángulo conocida como la Falla Ollachea. Esta formación se presenta en extensos afloramientos, alcanzando hasta 21 kilómetros de ancho al norte del distrito de Ollachea, según lo evidenciado en el mapa de los cuadrángulos de Ayapata y Corani. Su dirección va de noroeste a sureste, extendiéndose hacia el noroeste de la región de Cusco.

Se observa que esta formación ha sido afectada por un metamorfismo de grado débil en sus estratos más finos, lo que ha dado origen a pizarras. Al oeste de Ollachea, se encuentra fuertemente plegada, exhibiendo estructuras anticlinales y sinclinales. Estas rocas han sido intruidas por rocas ígneas tales como el granito de San Gabán del Carbonífero Inferior y la sienita de Macusani del Pérmico-Triásico (Luque E., 2013). En su parte inferior, la formación presenta areniscas de grano



fino a medio en capas de 20 a 40 centímetros de espesor, así como niveles finos de 10 centímetros de espesor intercalados con capas de pizarras negras. Además, se pueden observar laminaciones paralelas con presencia dispersa de pirita. Por otro lado, la parte superior de la formación está compuesta por areniscas de grano fino a medio en capas de 2 a 4 metros de espesor, las cuales muestran laminación cruzada (Luque E., 2013).

Edad y Correlación

Reimann (citado en Luque, 2013) realizó dataciones radiométricas de U/Pb en zircones, obteniendo edades de 436, 455, 497 y 519 Ma, con un error de +/- 28, +/- 10, +/- 26 y +/- 5 Ma, respectivamente, que corresponden al Ordovícico. Asimismo, se le asigna como edad el Ordovícico superior según la posición estratigráfica, donde infrayace a la Formación Ananea y suprayace al Grupo San José.

2.2.1.2. Formación Ananea (Sd-A)

Laubacher (1978) asignó esta nomenclatura debido a los extensos afloramientos encontrados en Ananea, ubicado en la Cordillera Oriental.

Chávez, A. (1997), indica que el espesor aproximado de la formación alcanza los 450 metros. En su parte inferior, está constituida por siltitas beige en capas de 40-60 cm de grosor, alternadas con pizarras negras. La parte media presenta la intercalación de cuatro sills correspondientes a microgranitos silicificados, con pirita diseminada. Mientras que la parte superior está compuesta por lutitas negras pizarrosas con laminación milimétrica. En el área de estudio, se observan



afloramientos en una franja este-oeste. En algunos sectores, se presenta un débil plegamiento y está afectada por metamorfismo regional.

Edad y correlación

La datación radiométrica mediante K-Ar en moscovitas de una estructura de cuarzo-oro arrojó una edad de aproximadamente 143.20 +/- 10.1 Ma (Kontak, Farrar, Clark y Archibald, 1990). Aunque generalmente esta formación se encuentra por encima de la Formación Sandia, en ciertas áreas ocurre lo contrario debido a la influencia de una falla inversa de alto ángulo, conocida como la Falla Ollachea. De acuerdo con Laubacher G. (1978), en términos de su posición estratigráfica, se le asignó una edad correspondiente al Siluro-Devónico.

2.2.2. Paleozoico Superior

2.2.2.1. Grupo Mitu (Ps-Mi)

Según Mc. Laughlin A. (1924), el Grupo Mitu está compuesto por una secuencia que incluye areniscas rojizas y grises, sobre las cuales se encuentran conglomerados arenosos, lutitas y una variedad de derrames volcánicos y piroclásticos, que van desde riolíticos hasta andesíticos, con una edad que se sitúa en el Permiano-Triásico. En la parte superior del grupo, se presenta una secuencia extensa y gruesa de derrames lávicos. Estas formaciones ocupan extensiones considerables alrededor del nevado Allin Capac, en la parte suroeste del cuadrángulo de Ayapata, alcanzando hasta los ríos Macusani y Corani. Sin embargo, los afloramientos más destacados se encuentran en el valle de los ríos Corani y Macusani, cerca



de Tantamaco, y se extienden hasta el puente San Francisco en la zona de estudio.

De acuerdo con Chávez, A (1997), el espesor de esta unidad oscila entre 1000 y 1500 metros, con coladas que van de 10 a 20 metros de grosor. La litología está compuesta principalmente por lavas andesíticas porfiríticas, las cuales se intercalan con lavas afaníticas de tonalidad oscura. La presencia de conglomerados y lutitas rojas sugiere la presencia de un ambiente continental afectado por la actividad volcánica lávica.

Edad y Correlación

Según Chávez, A. (1997), no se han hallado fósiles en este grupo. Sin embargo, Kontak et al. (1985) realizaron dataciones por Rb-Sr que sugieren edades de 270 y 210 millones de años, mientras que McBride, Clark, Farrar y Archibald (1983) obtuvieron edades de 280 y 245 millones de años mediante K-Ar en el noroeste de Bolivia. Estos resultados indican que la edad de este grupo varía desde el Pérmico superior hasta el Triásico inferior.

2.2.3. Cenozoico: Neogeno

2.2.3.1. Cuaternario

En la zona de estudio, se encuentran diversos depósitos que se relacionan con la geomorfología actual característica de la Cordillera Oriental. En áreas ubicadas en las faldas de los nevados, especialmente en sus partes inferiores, así como en los valles y altiplanicies, se pueden observar depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y aluviales.



A. Depósitos Morrénicos (Qh-Mo)

Según Chávez, A. et al. (1997), en el margen derecho de la cuenca Macusani, en el flanco occidental de los nevados de la cordillera Vilajota - Allin Capac, se han identificado extensas geoformas de morrenas que resultan de la acumulación glaciár durante el proceso de deshielo. Estas morrenas están compuestas por bloques subangulares, arenas, limos, gravas y bloques angulosos sin selección, con tamaños que oscilan entre 0,3 y 2,0 metros. Por encima de los 4200 metros sobre el nivel del mar, se encuentran morrenas de tipo lateral, que consisten en sedimentos de brechas polimícticas apoyadas sobre una matriz arenosa.

B. Depósitos Glaciofluviales (Qh-Gf)

Son el resultado de la meteorización de depósitos morrénicos y del substrato de rocas pre-cuaternarias. Estas geoformas se manifiestan como depresiones a una altitud de alrededor de 4000 metros sobre el nivel del mar, ubicadas en la cabecera de los valles aluviales, con pendientes suaves, originadas por la erosión glacial durante el derretimiento de los glaciares. En algunas áreas, estas depresiones están cubiertas por bofedales. Es importante destacar que la provincia de Macusani se encuentra en una zona de depósitos glaciofluviales, ya que se sitúa por encima de los 4500 metros sobre el nivel del mar, donde los materiales han sido erosionados y transportados hacia la extensa planicie que rodea el poblado de Macusani. Además, el suelo está compuesto principalmente por gravas y cantos, con una matriz de arena y limo que lo hace altamente permeable, como señaló Luque (2013) en su investigación.



C. Depósitos Aluviales (Q-AI)

Abundantes depósitos se encuentran en el fondo de los valles, terrazas y pampas alto andinas, los cuales son el resultado de la deposición fluvial y pluvial durante la etapa de relleno, así como de la colmatación y el aplanamiento. Estos depósitos están principalmente compuestos por gravas polimícticas, las cuales están soportadas por una matriz arenosa, tal como lo señaló Luque (2013) en su investigación.

2.2.4. Rocas Intrusivas

2.2.4.1. Complejo de San Gabán (pt-mzg/gr)

Chávez et al. (1997) señalan la presencia de afloramientos en la parte central este del cuadrángulo de Corani, así como en el borde central oeste del cuadrángulo de Ayapata, siendo el distrito de Corani donde se encuentra la mayor extensión de afloramientos. También se observan afloramientos en la carretera de Ollachea a San Gabán, específicamente entre el puente Chinquini y Chacaneque. Sin embargo, es importante mencionar que estos afloramientos son agrestes y están cubiertos por vegetación, lo que dificulta la observación de las zonas de contacto. Además, están atravesados por diques graníticos con un rumbo promedio de N60°E.

En la parte sur del nevado de Ananta en Corani, se puede observar que este intrusivo es homogéneo en cuanto a su textura y composición. Está caracterizado por la presencia de granitos y monzogranitos de color blanco a gris, con una granulometría gruesa. En estos afloramientos, se



pueden observar megacrístales de ortosa, fenómeno que también se presenta entre la zona de Uru-Huasi y Tunquini. Por otro lado, en la zona norte de Ollachea, entre Sapi-Sencca y Chacaneque, se encuentran composiciones de diorita de color gris oscuro y granulometría gruesa. Estas rocas intruyen en el Paleozoico, generando una extensa área de metamorfismo de contacto que da lugar a porfidoblastos de andalucita asociados con agregados de biotita.

Edad de Emplazamiento

Laubacher (1978) asigna una edad eohercínica a los intrusivos debido a la asociación entre la presencia de esquistosidad del eohercínico y la ocurrencia del intrusivo de San Gabán. Por otro lado, Chávez et al. (1997) consideran las facies de asimilación encontradas en los cuadrángulos de Corani y Ayapata, la posición en la secuencia paleozoica y la similitud espacial y temporal, así como la textura y composición con los afloramientos de intrusivos cercanos en la región, para ubicarlos en el Permo-Trásico.

2.2.4.2. Sienita Nefelinica (Jm-si)

Chávez et al. (1997) sostienen que en la confluencia del río Corani y Macusani se pueden observar contactos bien definidos, donde la intrusión corta a la formación Ananea en los alrededores del puente San Francisco, cerca del distrito de Ollachea. Esta intrusión muestra un color gris claro y una textura gruesa porfirítica. Además, atraviesa los volcanitas del Grupo Mitu, lo que evidencia metamorfismo de contacto, fenómeno



que también se observa en la zona de Chichacori y en las estribaciones orientales del nevado Chichiccapacc.

Edad de emplazamiento

La edad de este intrusivo muestra variaciones según diferentes estudios. Kontak (1984) llevó a cabo dataciones por K-Ar en biotitas, obteniendo edades de 174.4 ± 3.6 Ma y 155 ± 4.3 Ma. Por otro lado, Stewart (1974) realizó dataciones por K-Ar en biotitas, obteniendo una edad de 184.2 Ma. En contraste, Laubacher (1978) propuso una edad máxima de 260 Ma.

Tabla 1

Columna Estratigrafía Regional.

| ERATEMA | SISTEMA | SERIE | UNIDAD LITOSTRATIGRAFICA A | GROSOR(m) | LITOLOGIA | INTRUSIVOS |
|------------|-------------|----------|----------------------------------|-----------|--|---|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO | DEPOSITOS ALUVIALES | ±200 | Gravas y conglomerados mal clasificados. | |
| | | | DEPOSITO GLACIOFLUVIALES | | Conglomerados subredondeados, gravas. | |
| | | | DEPOSITOS MORRENICOS | | Bloques y gravas subangulosas. | |
| MEZOSOICO | TRIASICO | SUPERIOR | GRUPO MITU | ±1000 | Volcánicos andesíticos, areniscas arcósicas rojizas, conglomerados polimícticos y material brechoso. | COMPLEJO SAN GABAN (Granodiorita Metamorfizada) SIENITA NEFELINICA |
| PERMICO | | | | | | |
| PALEOZOICO | DEVONICO | | FORMACIÓN ANAÑEA | ±800 | Pizarras negras y azuladas, laminadas y foliadas microplegadas, niveles de lutitas negras, delgadas capas de siltitas y areniscas cuarzosas. | |
| ORDOVICICO | SILURICO | SUPERIOR | FORMACIÓN SANDÍA | ±1500 | Areniscas cuarzosas metamorfizadas gris blanquecinas, con micropliegues, intercalación de siltitas y pizarras. | |

Fuente: Modificado de Chávez, A. (1997).



2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

Según Chávez et al. (1997), el relieve estructural en la zona de estudio está constituido por una parte importante de la Cordillera Oriental. Se extiende desde el Paleozoico inferior, con una presencia menos marcada en terrenos del Paleozoico superior, mínimamente en el Cretácico, y algunas capas de ignimbritas del Neógeno. A lo largo de su evolución, ha experimentado diversos episodios de levantamiento tectónico, lo que se refleja en la presencia de múltiples fallas y pliegues longitudinales. En términos de composición litológica, las formaciones del Paleozoico inferior, mayormente de naturaleza pelítica excepto la Formación Sandía, compuesta por pizarras, areniscas y cuarcitas, muestran una deformación predominantemente plástica. Por otro lado, el Paleozoico superior exhibe una secuencia incompleta, con monoclinales afectados por fallas. Por último, las unidades del Neógeno presentan una disposición tabular subhorizontal con una leve inclinación hacia el noreste. Además, en el área de estudio se identifican tres sistemas principales de fallas: la falla Ollachea, la falla Paquillusi y la falla Corani, todas con una orientación general de noroeste a sureste.

2.3.1. Falla Paquillusi

Según Chávez et al. (1997), la falla Ollachea se caracteriza como una falla inversa de alto ángulo con una orientación predominante de N60°O, con una leve desviación hacia el suroeste, y se extiende desde el cuadrángulo de Corani hasta Quisayoc. En este tramo, la falla es intersectada por una falla transversal que se orienta en dirección N15°O, la cual podría representar la continuación de la falla Corani. Esta estructura tectónica actúa como el límite entre las rocas de la Formación Ananea al noreste y el Grupo Mitu al suroeste, además de estar en contacto con la sienita nefelínica en la dirección sureste.



2.3.2. **Falla Ollachea**

Según Chávez et al. (1997), se identifica como una falla inversa de alto ángulo con una orientación predominante de N75°O, aunque presenta una inflexión notoria hacia el sureste, especialmente destacada en el cerro Maychane. Esta falla se ubica en la parte central occidental del cuadrángulo de Ayapata y actúa como límite entre las rocas de la Formación Sandia al noreste y la Formación Ananea y el Grupo Mitu al suroeste.

2.3.3. **Falla Corani**

Según Chávez et al. (1997), esta falla se identifica como una falla inversa de alto ángulo con una orientación predominantemente Noroeste-Sureste. Ubicada entre Huacune y el cerro Angostura en el sector central del cuadrángulo de Corani, la falla establece el contacto entre las rocas del Permo-Triásico y las del Paleozoico inferior. Además, se ve interrumpida por una falla transversal en la quebrada Pachachani, que se extiende desde Occo Pata hasta Pampa Cerro, siendo esta última de formación más reciente.

2.4. **YACIMIENTOS OROGÉNICOS**

Los depósitos de oro asociados con terrenos metamorfizados regionalmente abarcan una amplia gama de edades geológicas y se forman en márgenes de placas convergentes. Se caracterizan por la presencia de vetas de cuarzo que contienen oro, a menudo con una mineralogía relativamente simple. Estos depósitos suelen experimentar altas temperaturas y presiones durante su formación, lo que los distingue de otros tipos de depósitos de oro. Además, los fluidos asociados a estos depósitos tienden a tener un



mayor contenido de CO₂. Sin embargo, no existe una definición precisa y única que englobe todos los aspectos de estos depósitos debido a su diversidad y complejidad.

2.4.1. Terminología

Estos depósitos son conocidos con diferentes términos, como oro mesotérmico, oro metamórfico, vetas de oro, depósitos alojados en zonas de cizalla, y aquellos controlados estructuralmente. También abarcan una variedad de depósitos alojados en esquistos verdes y turbiditas. El término "depósitos de oro orogénico" fue propuesto por Groves, Goldfarb, Gebre-Marian, Hagemann y Robert (1998) como una alternativa al término anterior "mesotérmico", que ha sido utilizado de manera incorrecta en comparación con la definición original de Lindgren (citado en Moritz, 2000). La confusión probablemente se debe a la naturaleza intrínseca de estos depósitos de oro que se encuentran en rocas metamórficas y altamente alteradas.

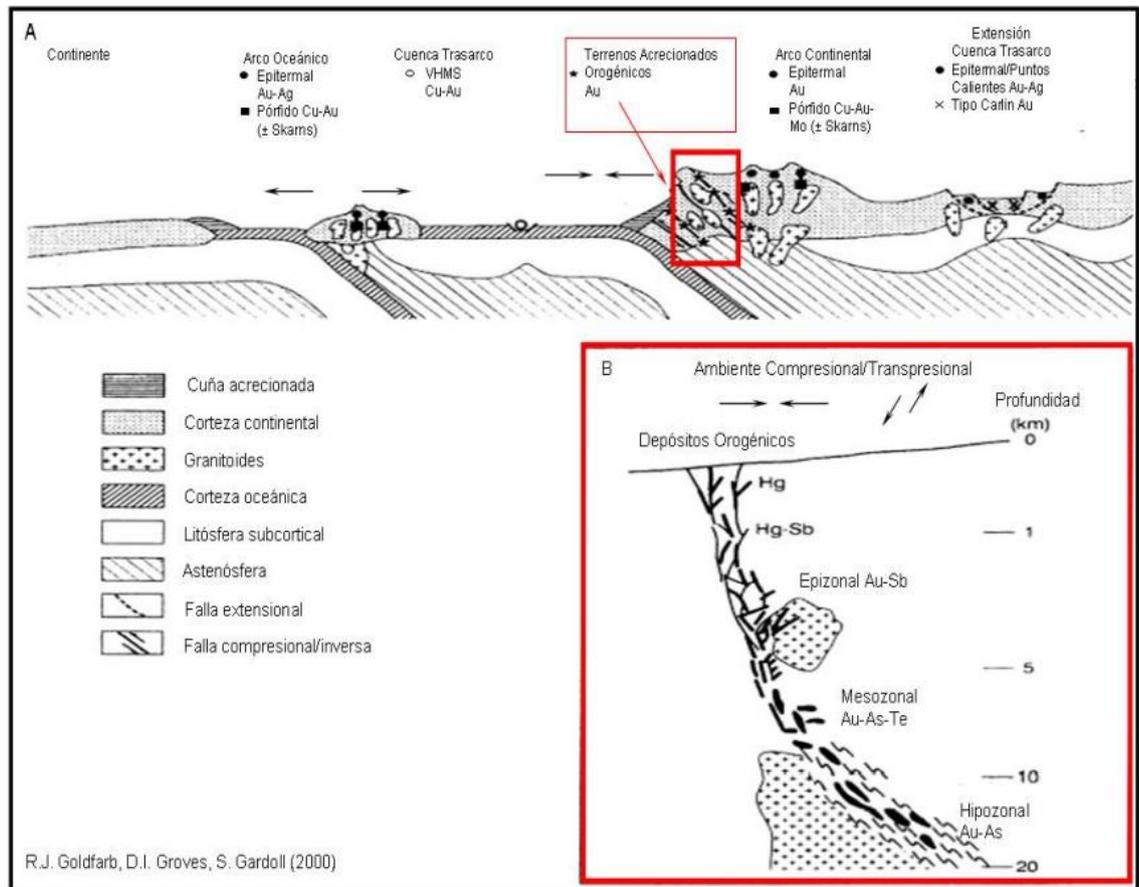
2.4.2. Características geológicas regionales

Los depósitos de oro orogénico se encuentran en una variedad de terrenos metamórficos de diferentes edades, que muestran distintos grados de deformación. Estos ambientes geológicos incluyen terrenos sedimentarios clásticos, volcánicos y plutónicos. Las rocas anfitrionas exhiben características metamórficas, que pueden variar desde esquistos verdes hasta facies de anfibolita o granulitas en algunas áreas. Por lo general, estos depósitos de oro se encuentran dentro o cerca de zonas de deformación regional de tipo frágil a dúctil en la corteza terrestre. Algunos de ellos podrían representar los antiguos límites tectónicos. Las estructuras geológicas suelen indicar ajustes tectónicos de compresión a

transpresión. Además, los depósitos de oro pueden estar alojados en cualquier tipo de roca en estas áreas.

Figura 1

Depósitos Minerales Epigenéticos Ricos en Oro



Fuente: Tomado de Goldfarb, Groves y Gardoll (2001).

2.4.3. Morfologías

La génesis de los depósitos de oro está mayormente influenciada por factores estructurales a diferentes escalas. La morfología de estos depósitos varía ampliamente e incluye varios tipos de estructuras, como fallas frágiles, zonas de cizallamiento dúctil, fracturas extensionales, stockworks y brechas, así como plegamientos. Los cuerpos mineralizados pueden estar compuestos



principalmente de rocas hospedadoras alteradas con mineralización diseminada o relleno de fisuras, como vetas. Además, estos depósitos pueden tener una extensión vertical considerable, a menudo superando los 1000 metros, y una gran extensión longitudinal.

2.4.4. **Mineralogía de mena y ganga**

Las vetas presentes en los depósitos orogénicos de oro están mayormente compuestas por cuarzo, acompañado de carbonatos y minerales de sulfuro, y en menor medida, por minerales como albita, clorita, mica blanca (fuchcita en rocas ultramáficas), turmalina y scheelita. Dentro de los minerales carbonatados se encuentran la calcita, dolomita y ankerita. El oro se deposita tanto en las vetas como en las paredes adyacentes, y suele estar estrechamente asociado con minerales de sulfuro, tales como pirita, pirrotita, calcopirita, galena, esfalerita y arsenopirita. En entornos volcánico-plutónicos, la pirita y la pirrotita son los minerales de sulfuro más comunes en las rocas huésped de facies de esquistos verdes y anfibolitas, respectivamente, mientras que la arsenopirita prevalece en los minerales alojados en rocas sedimentarias. Las proporciones de oro y plata generalmente oscilan entre 10:1 y 5:1, aunque a veces pueden ser 1:1. Aunque los sistemas de vetas pueden extenderse verticalmente hasta 1 a 2 km, por lo general no muestran cambios significativos en la mineralogía de mena y ganga.

2.4.5. **Relaciones geométricas**

Las estructuras que albergan los depósitos de oro, como las zonas de cizallamiento, las fallas, las vetas extensionales y las brechas, tienden a ser discordantes con respecto a las capas estratigráficas de las rocas huésped, aunque en ciertos casos pueden alinearse con la foliación y los pliegues plegados o los



contactos intrusivos. Esto evidencia la naturaleza epigenética de los depósitos de oro. Además, los desplazamientos de las estructuras mineralizadas pueden variar desde sin a post mineralización, lo que indica que los depósitos de oro son sintectónicos.

2.4.6. Alteración Hidrotermal

Se presenta una distribución zonificada en los depósitos de oro, con una progresión que va desde los ensambles proximales hasta los distales. La intensidad de la alteración disminuye a medida que se aleja de los cuerpos mineralizados. La magnitud, la intensidad y la composición mineralógica de la alteración están influenciadas por el tipo de roca huésped y la profundidad en la corteza (McCuaig y Kerrich, 1998). La alteración es más prominente en las rocas ígneas intermedias a ultramáficas, mientras que en las rocas sedimentarias clásticas, está restringida a zonas estrechas alrededor de los cuerpos mineralizados. Los principales minerales de alteración en las rocas huésped incluyen carbonatos (como calcita, dolomita, ankerita, a veces siderita y magnesita), sulfuros (principalmente pirita, pirrotita o arsenopirita), silicatos ricos en álcalis (como sericita, fuchsite, albita, y ocasionalmente feldespato K, biotita, paragonita), clorita y cuarzo. La carbonatación, sulfuración y metasomatismo alcalino de la roca huésped reflejan la incorporación de CO₂, S, K, Na, H₂O y LILE durante el proceso de mineralización. A profundidades más profundas en la corteza, bajo condiciones metamórficas de anfibolita y granulita, se encuentran anfíboles, diópsidos, plagioclasas y granates, mientras que los minerales carbonatados son menos abundantes.



2.4.7. **Leyes y tonelajes**

La concentración de oro en estos depósitos suele ser relativamente alta, históricamente oscilando entre 5 y 30 gramos por tonelada (g/t). Además del oro, pueden contener concentraciones elevadas de otros metales como Bi, Hg, Sb, Te y W. También se ha observado un aumento ligeramente por encima del promedio regional en los contenidos de Cu, Pb y Zn. Los recursos estimados para los depósitos de oro orogénico, tanto arqueanos como fanerozoicos, generalmente varían entre 0 y 30 millones de onzas (Moz) de oro, lo que equivale a 0-850 toneladas de oro. Sin embargo, los depósitos más grandes pueden llegar a contener hasta asombrosamente 200 Moz (5700 t) de oro. Es notable que debido a sus altas leyes, estos depósitos fueron explotados desde los primeros tiempos de la civilización.

2.4.8. **Geocronología**

La datación radiométrica ha sido fundamental para establecer un marco de tiempo absoluto que integra los depósitos orogénicos de oro en la evolución geológica regional de sus entornos hospedantes. Técnicas como el $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$, Sm-Nd y la datación U-Pb SHRIMP o convencional han permitido precisar las relaciones temporales entre eventos tectónicos, metamórficos, magmáticos y la formación de minerales. La formación de los depósitos de oro orogénico puede ocurrir poco después o algunos millones de años después de la actividad magmática, el metamorfismo regional y la deformación, hasta varias décadas después de los eventos orogénicos iniciales en las rocas hospedantes. Los datos radiométricos han revelado que la formación de estos depósitos es episódica y puede extenderse a lo largo de un período prolongado durante la evolución tardía



de una provincia tectónica, a medida que las rocas hospedantes experimentan procesos de calentamiento y enfriamiento progresivos..

Por ejemplo, estudios de geocronología utilizando las técnicas $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ y SHRIMP U-Pb en depósitos de oro alojados en turbiditas en Australia han revelado una mineralización episódica de oro hidrotermal que ocurrió durante un período prolongado en el Paleozoico medio, con edades de 420-455 Ma que coinciden con el metamorfismo regional y la actividad tectónica, y de 360-380 Ma, superpuestas con la actividad magmática fechada en 360-410 Ma (Arne et al. y Foster et al., como se citó en Moritz, 2000).

En la región de Pataz, en Perú, según un estudio realizado por Haerberlin y colaboradores en 1999, parece que el proceso de mineralización ocurrió en un intervalo de tiempo relativamente corto, posiblemente en unos pocos millones de años. Estas variaciones resaltan la importancia de seleccionar con cuidado los minerales para llevar a cabo la datación, dado que los resultados pueden variar significativamente.

2.4.9. Entorno geodinámico

Los depósitos de oro orogénico del Fanerozoico están asociados espacialmente con los límites de placas convergentes (Goldfarb et al., 1998). Basándose en las similitudes geológicas entre estos y los depósitos ubicados en cinturones de esquistos verdes arcaicos, también se sugiere una relación con zonas de convergencia de placas para los depósitos arcaicos (Barley et al., Hodgson-Hamilton, Kerrich y Wyman, como se citó en Moritz, 2000).



Goldfarb et al. (2001) identifican una correlación significativa entre la formación de depósitos de oro orogénico y los eventos térmicos relacionados con el crecimiento de la corteza continental durante la evolución geológica de la Tierra. La formación de estos depósitos a nivel global fue episódica, ocurriendo aproximadamente a 3100 Ma, entre 2700 y 2500 Ma, entre 2100 y 1700 Ma, y durante el Fanerozoico.

2.4.10. Características isotópicas: fuentes de fluidos y solutos

Los isótopos ofrecen una herramienta valiosa para distinguir entre los principales reservorios de fluidos, incluyendo el manto, los flujos meteóricos y la corteza (Pettke et al., según se mencionó en Moritz, 2000). Estudios isotópicos han examinado diversos minerales y inclusiones de fluidos para determinar el origen de solutos y fluidos, así como los procesos de deposición mineral. Dado que el oro es monoisotópico (^{197}Au), la información sobre su origen en las rocas se obtiene a partir del análisis de los isótopos estables de estroncio y plomo. Sin embargo, aún no hay un consenso global sobre la interpretación de la vasta cantidad de datos recopilados hasta la fecha.

Para identificar la fuente de los fluidos en la formación de depósitos orogénicos de oro, se han utilizado ampliamente los isótopos de hidrógeno y oxígeno. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los fluidos generalmente varían entre +6 y +11 (SMOW), mientras que los valores de δD oscilan entre -30 y -80 (SMOW). Tanto los fluidos metamórficos (McCuaig y Kerrich, 1998) como los magmáticos (So y Yun, según se mencionó en Moritz, 2000) se ajustan razonablemente a los valores observados. Sin embargo, se han registrado valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD fuera de los rangos "típicos" en varios depósitos..

Los datos isotópicos de carbono y sulfuro muestran una considerable variabilidad en los depósitos de oro orogénico de todas las edades y diferentes distritos (McCuaig y Kerrich, 1998). Esta amplia gama de datos isotópicos puede deberse a interacciones entre diversos tipos de rocas y los fluidos mineralizadores a lo largo de su recorrido, desde su origen hasta el lugar de deposición del oro, así como a condiciones químicas variables antes y durante la formación de minerales. Del mismo modo, la sistemática de isótopos de Pb y Sr en diferentes minerales de depósitos de oro orogénico no ha permitido identificar un único reservorio de roca como la fuente del oro.

2.4.11. Características de inclusiones fluidas

Los depósitos orogénicos de oro se caracterizan por la presencia de cuatro tipos principales de fluidos: (1) fluidos de H₂O-CO₂ de dos a tres fases, que también pueden contener cantidades variables de CH₄, N₂ y sales disueltas; (2) inclusiones ricas en CO₂ con contenido variable de CH₄, N₂ y H₂S, y con bajos niveles de H₂O o incluso indetectables; (3) fluidos de H₂O bifásicos con niveles moderados a bajos de salinidad, con o sin presencia de CO₂; y (4) inclusiones de H₂O saturadas, a veces con presencia de una fase sólida de sal.

La presencia de CO₂ en los fluidos está en total consonancia con la carbonatación de las rocas que albergan los depósitos de oro orogénico. Esta alta concentración de CO₂ distingue a los fluidos asociados con estos depósitos de oro de aquellos encontrados en otras categorías principales de yacimientos. Esta particularidad se considera como evidencia de un origen profundo para los fluidos que forman los minerales, como la granulitización de la corteza inferior o la liberación gradual de fluidos en condiciones de facies de anfíbolita. La salinidad



de los fluidos mineralizantes relacionados con la deposición de oro suele ser inferior al 10% en peso de NaCl equivalente. La combinación de datos de inclusión de fluido y otros factores sugiere un rango de presión y temperatura para la formación mineral de 1-3 kbar y 250-350 °C. Algunos depósitos menos profundos pueden haberse formado a tan solo 0.5 kbar y 150 °C, mientras que los depósitos más profundos podrían haberse formado bajo presiones más altas de hasta 5 kbar y temperaturas de hasta 700 °C (Moritz, 2000).

2.4.12. **Impacto ambiental**

La presencia de arsenopirita (FeAsS) en los depósitos de oro orogénicos puede tener un impacto ambiental significativo, especialmente cuando se considera como un subproducto no deseado. Durante el procesamiento de estos minerales, ya sea mediante técnicas hidrometalúrgicas o pirometalúrgicas, la arsenopirita puede sufrir modificaciones que liberan arsénico al medio ambiente, ya sea parcial o completamente. Este problema se agrava en presencia de piritita, lo que puede desencadenar drenaje ácido de la mina, exacerbando aún más las preocupaciones ambientales (Moritz, 2000).

2.4.13. **Modelo genético**

Según cálculos realizados por Mikucki y Ridley, citados en el trabajo de Moritz (2000), los depósitos de oro orogénicos se han formado principalmente a partir de fluidos moderadamente reducidos, con un pH que oscila entre casi neutro y débilmente alcalino, en todos los niveles de la corteza, basados en el equilibrio de fases, inclusiones de fluidos, datos isotópicos y termodinámicos.



Debido a las dificultades para identificar una única fuente de oro y los fluidos responsables de la formación de minerales, se han propuesto varios modelos genéticos. Los principales modelos incluyen: (1) granulitización de la corteza inferior debido a la infiltración de fluidos enriquecidos con CO₂ del manto, acompañados por magmatismo félsico; (2) fluidos magmáticos liberados de intrusiones de tonalita-trondhjemita-granodiorita; (3) fluidos generados por procesos metamórficos; y (4) circulación profunda de agua meteórica.

Según Groves et al. (1998), estos depósitos se formaron en una variedad de niveles de la corteza. Se propusieron diferentes términos según la profundidad de la formación: epizonal para menos de 6 km, mesozonal para 6-12 km e hipozonal para más de 12 km..

2.5. INCLUSIONES FLUIDAS

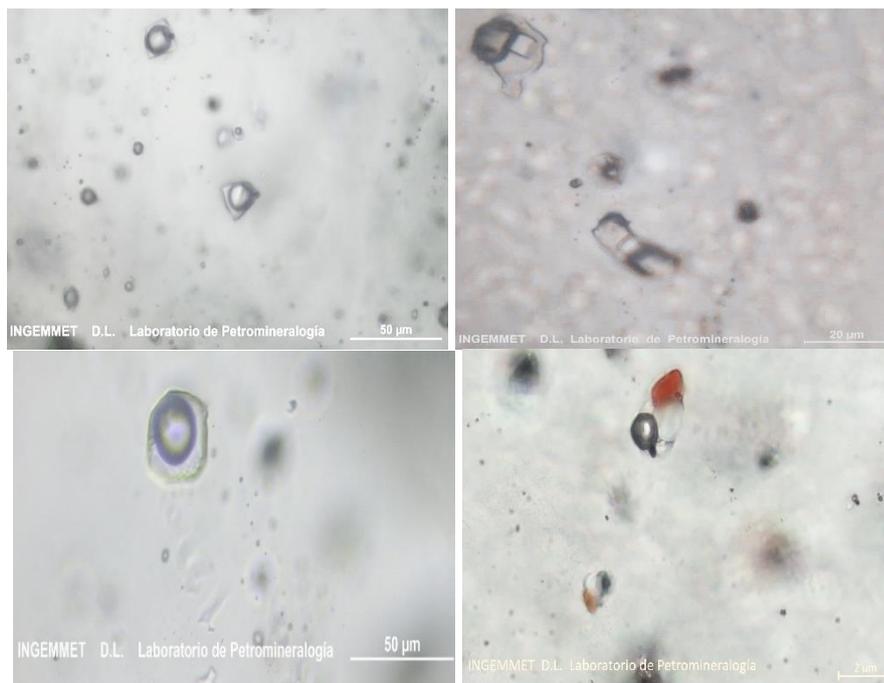
Roedder (1984) describe las inclusiones fluidas (IF) como pequeñas cavidades dentro de los minerales, llenas de sustancias atrapadas durante su crecimiento o después de él, en las imperfecciones de su estructura cristalina. Además, Roedder (1984), Goldstein y Reynolds (1994) señalan que estas inclusiones pueden contener fases líquidas, sólidas y gaseosas, que se originan en el medio acuoso donde la mayoría de los minerales se forman. Por lo tanto, constituyen una herramienta valiosa en geología para revelar las condiciones físicas y químicas presentes durante la formación de los minerales que las albergan.

Antes de comenzar el estudio de las inclusiones fluidas (IF), es esencial tener en consideración las reglas establecidas por Roedder (1984), quien definió tres condiciones o hipótesis fundamentales para obtener información válida:

1. La inclusión debe atrapar un fluido hidrotermal homogéneo antes de enfriarse.
2. La masa (m) es igual a la constante (K); lo que indica que el sistema es cerrado, no hay pérdida de fluido y la masa ha permanecido constante.
3. El volumen (v) es igual a la constante (K); lo que indica que el volumen ha permanecido constante.

Figura 2

Inclusiones Fluidas



Fuente: Elaboración propia.

2.5.1. Clasificación de Inclusiones Fluidas

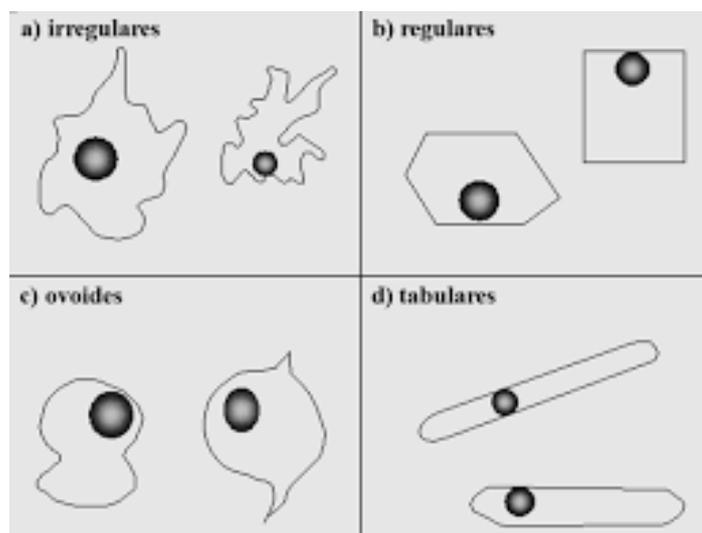
2.5.1.1. Según su forma

- Velasco (2004) llevó a cabo una revisión bibliográfica, de la cual se deduce la definición de cuatro tipos de inclusiones fluidas (IF) basados en su forma

- Irregulares: estas IF presentan bordes difusos que no guardan similitud alguna con la forma del cristal que las contiene.
- Regulares: estas IF exhiben bordes rectos que en algunos casos se asemejan estrechamente a la morfología del cristal que las alberga.
- Ovoides: estas IF muestran bordes redondeados y tienen morfologías esferoidales, algunas con terminaciones en forma de gancho o huso.
- Elongadas: estas IF tienen una forma alargada y se consideran una variante extrema del tipo ovoide.

Figura 3

Morfología de Inclusiones Fluidas



Fuente: Tomado de Velasco, 2004.



2.5.1.2. Según su contenido

Velasco (2004) llevó a cabo una revisión bibliográfica, a partir de la cual identificó tres tipos principales de inclusiones fluidas (IF) según la naturaleza de su contenido, que generalmente consisten en gases, líquidos y sólidos:

a) Monofásicas: Estas inclusiones están compuestas exclusivamente por una fase, que puede ser líquida (L), gas (V) o sólida (S). La composición de los fluidos suele ser principalmente acuosa.

b) Bifásicas: Estas inclusiones están formadas únicamente por dos fases, generalmente vapor (V) y líquido (L). Sin embargo, existen subtipos:

- Ricas en líquido (L + V): donde la fase líquida predomina sobre la fase de vapor.

- Ricas en gases (V + L): donde la fase de vapor es mayor que la fase líquida. Su ocurrencia se observa típicamente en ambientes de ebullición.

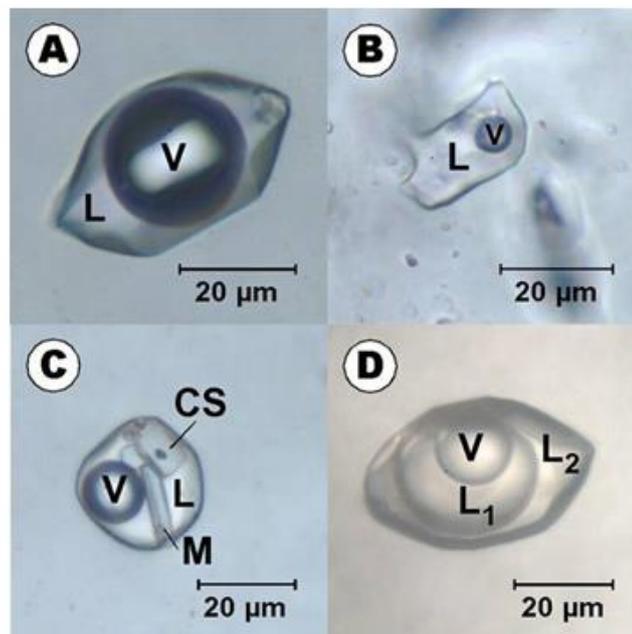
c) Trifásicas: Estas inclusiones consisten en la coexistencia de las tres fases: líquido, vapor y sólido. Sin embargo, también pueden existir combinaciones donde predominen ciertas fases o incluso la coexistencia de dos tipos de líquidos (L1 + L2 + V, L + V + S, S + L + V, etc.).

d) Polifásicas o multifásicas: En estas inclusiones, se observa la presencia de más de un sólido, llamados minerales hijos, que coexisten con una fase líquida y vapor. Entre los minerales hijos más comunes se

encuentran la halita, silvita, anhidrita, hematita, cuarzo, sulfuros de hierro, dawsonita, entre otros. La fase líquida puede ser inmisible, como el CO₂ junto con la presencia de CH₄, N₂ y/o H₂S.

Figura 4

Morfología de Inclusiones Fluidas



Fuente: Tomado de Dubois, 1992.

Además, según la composición de las inclusiones fluidas (IF), Nash (1976) determinó cuatro tipos principales de inclusiones, etiquetadas como (L = líquido; V = vapor; S = sólido; C = carbónicas):

Tipo L (I): Estas inclusiones son ricas en líquido, de moderada salinidad, con menos del 26% de equivalente de cloruro de sodio (NaCl), y contienen una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (vapor de agua).

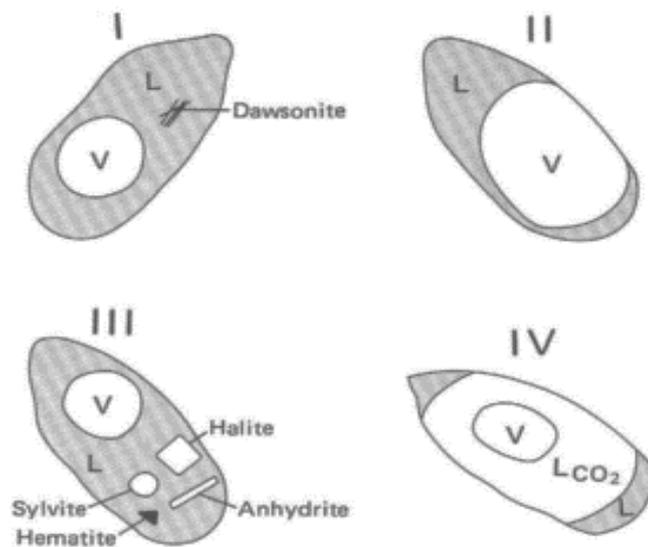
Tipo V (II): Estas inclusiones son ricas en gas, donde la fase de vapor representa más del 60% de la inclusión. Suelen observarse en ambientes de ebullición.

Tipo S (III): Este tipo de inclusiones son muy salinas, con fluidos altamente saturados con salinidades superiores al 26% de equivalente de cloruro de sodio (NaCl). Se pueden observar cristales de halita, así como algunos de silvita, anhidrita, hematita, entre otros.

Tipo C (IV): Estas inclusiones están compuestas por dos líquidos y minerales hijos. Contienen líquidos inmiscibles de H₂O y CO₂, además de fases sólidas.

Figura 5

Tipos de Inclusiones Fluidas



Fuente: Según Nash (1976)

(L=Líquido, V=vapor, S=sólido y LCO₂=líquido de CO₂).

Tabla 2

Propiedades Ópticas de los “Minerales Hijos”.

| Mineral y fórmula | Sistema cristalino | Hábito | Birrefringencia | Comentarios adicionales |
|---|---------------------------|------------------------------|------------------------|--|
| Halita NaCl | Cúbico | Cubos | Isótropo | Menos común en octaedros |
| Silvita KCl | Cúbico | Cubos | Isótropo | A menudo, con bordes redondeados |
| Anhidrita CaSO ₄ | Ortorrómico | Prismas | Baja | Puede estar presente el yeso(CaSO ₄ ·2H ₂ O) |
| Nahcolita NaHCO ₃ | Ortorrómico | Tabular | Muy alta | Común que esté maclada.Cambio de relieve bajo N// |
| Mineral y fórmula | Sistema cristalino | Hábito | Birrefringencia | Comentarios adicionales |
| Dolomita Ca,Mg)CO ₃ | Trigonal | Romboédrico | Muy alta | Fuerte relieve, así como cambio de relieve bajoN// |
| Cloruros-Fe FeCl _n | Variable | Tabular (rómico o hexagonal) | Moderada a alta | Común color verde ligero |
| Dawsonita NaAl(CO ₃)(OH) ₂ | Ortorrómico | Fibroso | Moderada | CaSO |
| Hematites Fe ₂ O ₃ | Trigonal | Planos Hexagonales | No | Cristales distintivos rojos y/o marrones |
| Sulfuros-Fe,Cu variable | Variable | Variable (granos euhédricos) | No | Posible reconocerlos con luz reflejada y distinguirlos de óxidos |
| Micas variable | Monoclínico | planos | Baja a moderada | Placas extremadamente finas |

Fuente: Modificado de Shepherd et al. (1985).



2.5.1.3. Según su origen

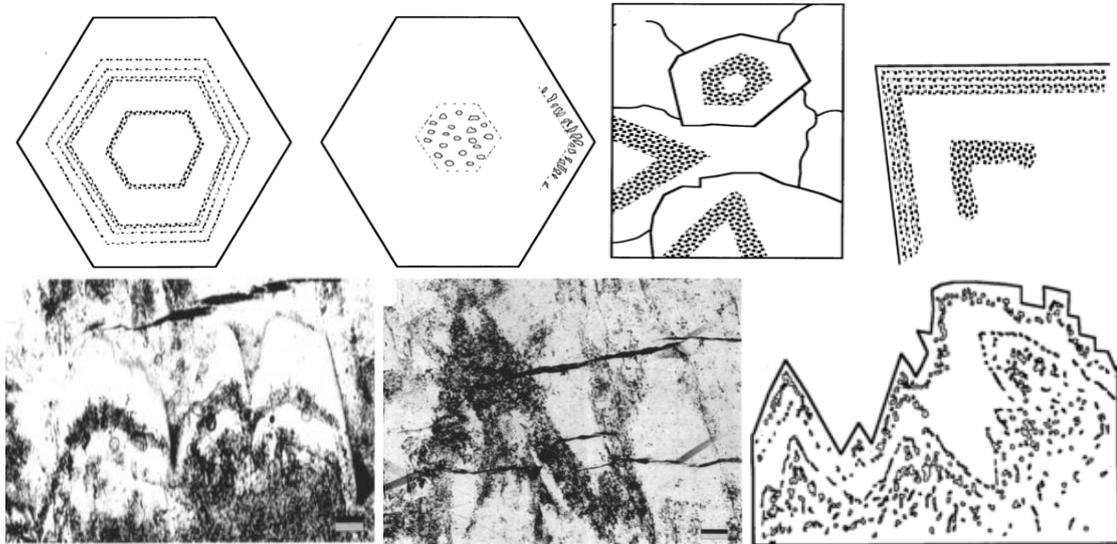
Roedder (1984) y Goldstein (2003) definen tres tipos de IF basados en la temporalidad de atrapamiento de los distintos fluidos encontrados en el mineral hospedante:

A. Inclusiones primarias

Roedder (1984), Goldstein y Reynolds (1994), Goldstein (2003) y Bodnar (2003) explican que las inclusiones fluidas son atrapadas durante el crecimiento del cristal, representando porciones del fluido mineralizante y reflejando las condiciones termodinámicas del fluido original. Suelen manifestarse en planos de crecimiento o en pequeñas imperfecciones durante la formación del cristal, mostrándose de manera aislada (ver Figura 6). Estas inclusiones no atraviesan los límites de los granos, siendo intragranulares, aunque algunas también pueden ubicarse en los planos de crecimiento en el borde de los cristales, siendo así intergranulares.

Figura 6

Disposición de Inclusiones Fluidas de Origen Primario.



Fuente: Tomado de Goldstein y Reynolds, 1994.

B. Inclusiones secundarias

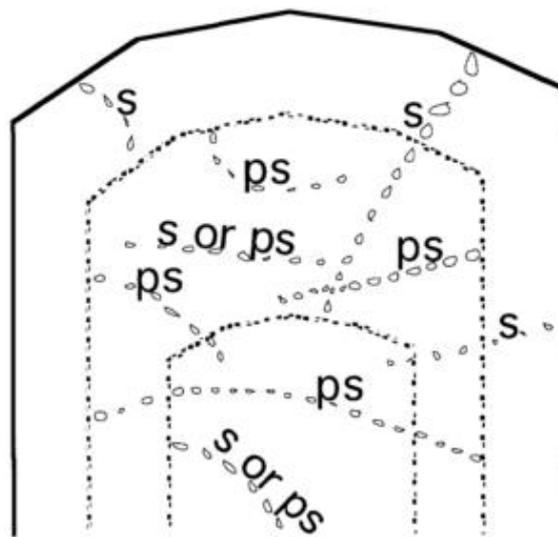
Según Roedder (1984), Goldstein y Reynolds (1994), Goldstein (2003) y Bodnar (2003), las inclusiones fluidas (IF) se forman después de la cristalización del mineral que las contiene. Por lo general, se localizan en fracturas por donde han circulado los fluidos, así como en las irregularidades de los minerales, donde son rellenadas en un proceso de solución y recristalización. Estas inclusiones representan las condiciones termodinámicas del fluido posterior a la formación del mineral anfitrión. Además, suelen atravesar y cortar los límites de los granos minerales, lo que las clasifica como inclusiones transgranulares.

C. Inclusiones pseudosecundarias

Roedder (1984), Goldstein y Reynolds (1994), Goldstein (2003) y Bodnar (2003) señalan que las inclusiones fluidas (IF) presentan una clasificación incierta entre primarias y secundarias, ya que representan un estado intermedio entre ambas. Se forman durante el fracturamiento de un cristal durante su crecimiento, donde las IF quedan atrapadas y posteriormente selladas. Estas inclusiones son evidencia de la presencia de fluidos posteriores a aquellos que formaron el mineral, y a diferencia de las inclusiones transgranulares, no atraviesan los límites de los granos. En cambio, se comportan como inclusiones intragranulares.

Figura 7

Esquema de las Inclusiones Fluidas Primarias (P), Secundarias (S) y Pseudosecundarias (Ps).



Fuente: Tomado de Goldstein y Reynolds, 1994.

2.5.2. Cambios Posteriores de las Inclusiones de Fluidos



Bodnar et al. (1985) mencionan que las inclusiones fluidas (IF) pueden sufrir cambios posteriores a su atrapamiento, lo que puede resultar en modificaciones en volumen, morfología y, en ocasiones, pérdida del fluido original. A continuación, se explican algunos de los posibles cambios::

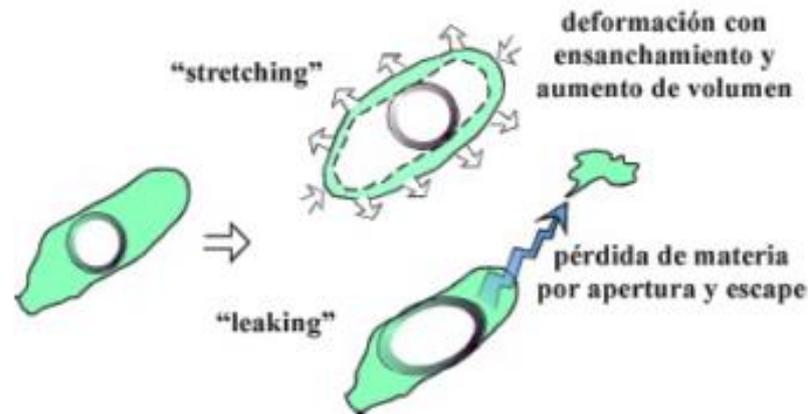
A. La contaminación por fluidos posteriores ocurre cuando un cristal se fractura, permitiendo que fluidos más jóvenes circulen a través de él y se mezclen, por difusión o contacto directo, con el fluido original de las inclusiones fluidas (IF), tal como fue señalado por Cosme (2013).

B. El "stretching" o extensión, según Bodnar et al. (1985), se refiere al sobrecalentamiento del mineral anfitrión de las inclusiones fluidas, que puede llevarlo a traspasar su límite, provocando cambios de volumen sin llegar a fracturarse.

C. El "leakage" o fuga, de acuerdo con Bodnar et al. (1985), implica que un mineral puede ser deformado, dejando una morfología especial en las inclusiones fluidas. En la práctica, este cambio puede reconocerse si los resultados de las mediciones de temperatura no son reproducibles después de realizarlas varias veces, lo cual se considera evidencia de "leakage".

Figura 8

Esquema de los Fenómenos de Stretching y Leakage.

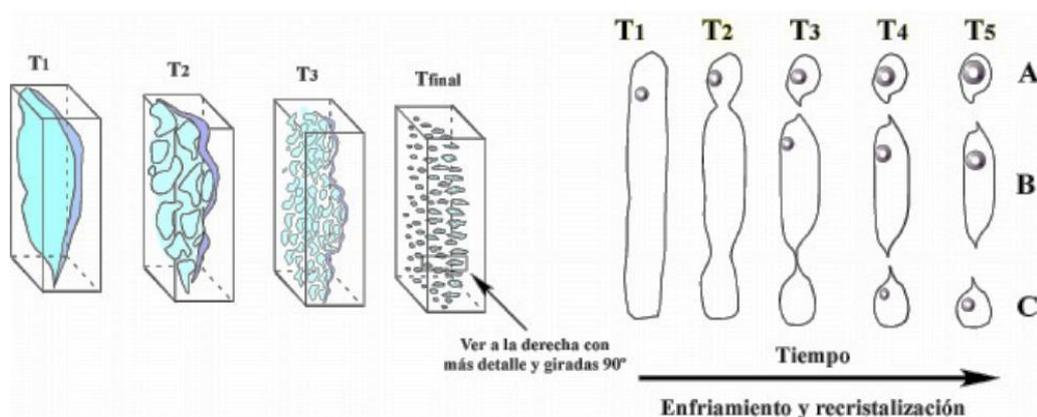


Fuente: Tomado de Velasco, 2004.

D. El "necking down" o estrangulamiento, según Bodnar et al. (1985), describe un fenómeno en el cual las inclusiones fluidas (IF) son estranguladas de manera heterogénea, resultando en la formación de diversas IF con diferentes grados de relleno y temperaturas variables. Este proceso puede originarse debido a procesos de redisolución y recristalización durante la confinación y el enfriamiento del fluido.

Figura 9

Proceso de Necking Down a Partir de una Inclusión Tabular



Fuente: Tomado de Velasco, 2004.



E. La decrepitación ocurre cuando se incrementa la temperatura de la inclusión fluida (IF), lo que resulta en un aumento de la presión interna que supera la presión externa de confinamiento. Esto puede llevar a la explosión de la IF o a la fractura del mineral hospedante, lo que provoca la fuga del fluido.

2.5.3. **Sistemas de Fluidos de Interés**

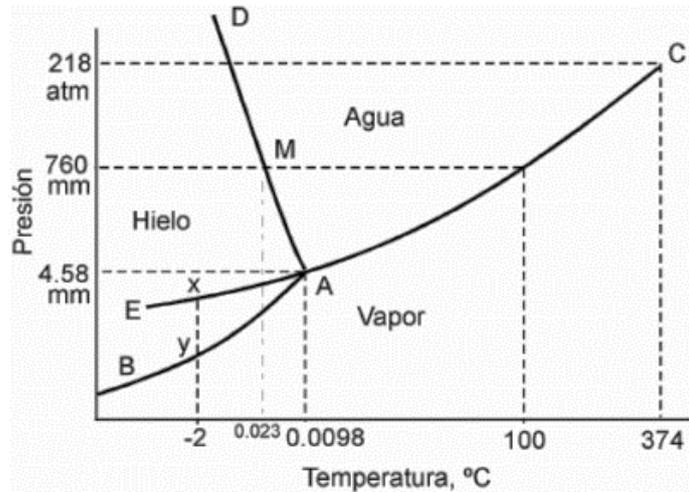
Hay una variedad de sistemas a los que los fluidos pueden pertenecer, los cuales pueden consistir en uno, dos o más componentes dependiendo de su composición. Entre estos, se encuentran los siguientes sistemas más comunes:

2.5.3.1. **Sistema H₂O**

Velasco (2004) indica que el sistema de H₂O es el más frecuente y bien conocido. En este sistema, el ambiente hidrotermal es particularmente significativo, donde las condiciones óptimas implican bajas presiones y temperaturas cercanas al punto triple. En dicho punto, las fases sólida, líquida y de vapor del agua coexisten, teniendo lugar a una temperatura de aproximadamente 0.0098°C y una presión de 4.58 mm.

Figura 10

Diagrama P-T del Sistema H₂O.



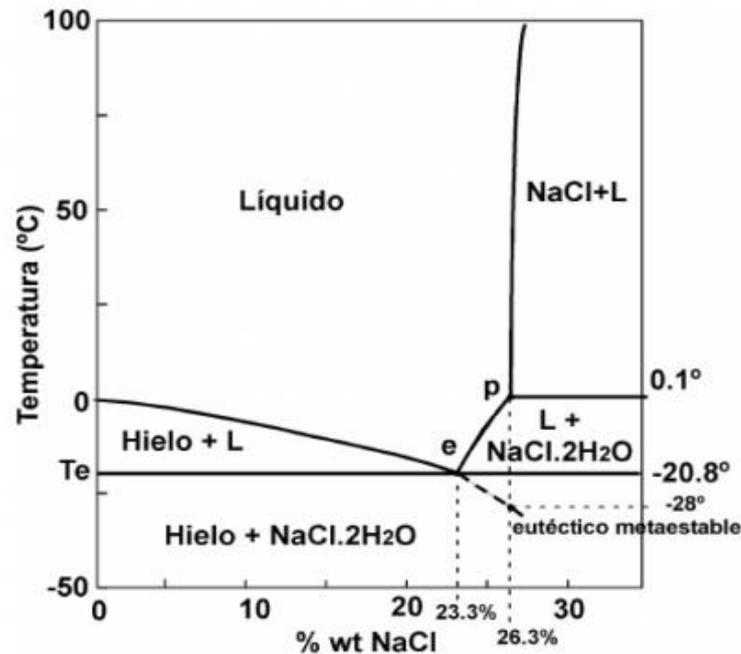
Fuente: Tomado de Velasco, 2004.

2.5.3.2. Sistema H₂O-NaCl

La mayoría de los fluidos hidrotermales y naturales no están compuestos únicamente de agua pura; más bien, suelen contener soluciones salinas. Estas soluciones típicamente contienen iones disueltos de NaCl y, en menor medida, KCl, CaCl₂ y MgCl₂, concentrados en la fase líquida. Se caracterizan por tener un punto eutéctico mínimo específico para cada sistema, y por la presencia de hidratos de sal a bajas temperaturas, coexistiendo con hielo. Además, existen soluciones saturadas donde, a temperatura ambiente, se pueden observar cristales de cloruros del catión correspondiente, como la halita y la silvita, entre otros. Este sistema acuoso salino está bien documentado en comparación con otros sistemas, como han señalado Roedder (1984) y Potter, Clynne y Brown (1978).

Figura 11

Diagrama T-X Para el Sistema H₂O-NaCl



Fuente: Modificado de Potter et al., 1978.

A una presión de 1 bar, todas las fases están en equilibrio con el vapor. En este sistema, es posible realizar mediciones para determinar las temperaturas de homogeneización y fusión del hielo, lo que proporciona la temperatura de formación y el porcentaje de salinidad del fluido. A medida que el punto de fusión del hielo desciende o se aleja de cero (0), aumentará progresivamente la presencia de sales disueltas, debido a la adición de NaCl al agua. Cabe mencionar que el sistema de fluidos naturales netamente presenta salinidad variable de 0% a 60% wt. NaCl. Por debajo del punto eutéctico (-20.8°C), coexisten hielo e hidrohalita. Para conocer con aproximación la composición de estos sistemas es imprescindible observar el inicio de la fusión de los sólidos o la temperatura del eutéctico (ver tabla 3).

La temperatura crítica y la presión son proporcionalmente con el total de NaCl disuelto. Por ejemplo, punto crítico de H₂O puro, 374 ° C y 221 bar, se desplaza a 662 ° C y 968 bar con un 25% en masa de NaCl disuelto (Knight and Bodnar, 1989).

La temperatura crítica y la presión se incrementan proporcionalmente con la cantidad total de NaCl disuelto. Por ejemplo, si consideramos el punto crítico del agua pura, que es de 374 °C y 221 bar, este se eleva a 662 °C y 968 bar cuando se disuelve un 25% en masa de NaCl (Knight and Bodnar, 1989).

Tabla 3

Temperatura del Punto Eutéctico para Diversos Sistemas Salinos-Acuosos (A 1 Atm).

| Sistema salino | Temp. eutéctico (°C) | Fases sólidas |
|--|----------------------|--|
| H ₂ O-NaCl-CaCl ₂ | -55 (-52) | hielo+NaCl.2H ₂ O+CaCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-MgCl ₂ -CaCl ₂ | -52.2 | hielo+ MgCl ₂ .12H ₂ O+CaCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-KCl-CaCl ₂ | -50.5 | hielo+ CaCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-CaCl ₂ | -49.8 | hielo+ CaCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-Na ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ | -37.0 | hielo+ (Na,K) ₂ CO ₃ .6H ₂ O+ K ₂ CO ₃ .6H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-FeCl ₂ | -37.0 | hielo+ NaCl.2H ₂ O+FeCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-FeCl ₂ | -35.0 | hielo+ FeCl ₂ .6H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-MgCl ₂ | -35.0 | hielo+ NaCl.2H ₂ O+MgCl ₂ .12H ₂ O |
| H ₂ O-MgCl ₂ | -33.6 | hielo+ MgCl ₂ .12H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-KCl | -23.5 (-22.9) | hielo+ NaCl.2H ₂ O+ KCl.nH ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-NaSO ₄ | -21.7 | hielo+ NaCl.2H ₂ O+Na ₂ SO ₄ .5H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-NaHCO ₃ | -21.8 | hielo+ NaCl.2H ₂ O+NaHCO ₃ |
| H ₂ O-NaCl-Na ₂ CO ₃ | -21.4 | hielo+ NaCl.2H ₂ O+Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl | -21.2 (-21.8) | hielo+ NaCl.2H ₂ O |
| H ₂ O-KCl | -10.6 | hielo+ KCl.nH ₂ O |
| H ₂ O-NaHCO ₃ -Na ₂ CO ₃ | -3.3 | hielo+NaHCO ₃ +Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O |
| H ₂ O-NaHCO ₃ | -2.3 | hielo+NaHCO ₃ |
| H ₂ O-Na ₂ CO ₃ | -2.1 | hielo+Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O |
| H ₂ O-Na ₂ SO ₄ | -1.2 | hielo+Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O |

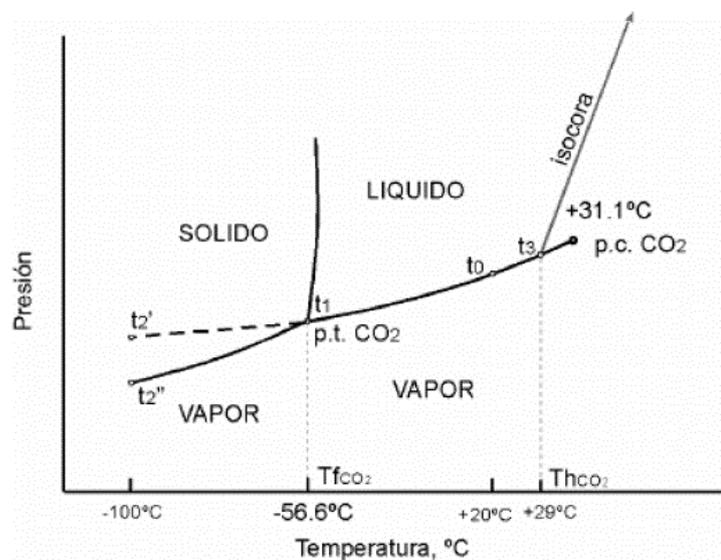
2.5.3.3. Sistema H₂O-CO₂

Es fundamental recordar que, dentro de este sistema, el punto triple (p.t.) de equilibrio de las tres fases se encuentra a -56.6°C, mientras que el

punto crítico (p.c.) se sitúa a $+31.1^{\circ}\text{C}$ (que corresponde a la temperatura de homogenización parcial). En ciertas ocasiones, puede ocurrir que el líquido no se congele a la temperatura del punto triple. Esto podría ser debido a una trayectoria de tipo metaestable al enfriar el líquido, como se muestra en la curva discontinua en el campo del sólido ($t_1 \rightarrow t_2'$) en la figura 12. Para resolver este problema, es necesario asegurar un enfriamiento por debajo de los -100°C y luego proceder al calentamiento de la inclusión, lo que la llevará por la curva sólido-vapor hasta alcanzar el punto triple (-56.6°C). Es de suma importancia también observar la "temperatura de fin de fusión" del CO_2 para determinar la composición del fluido. Si se obtienen datos distintos a los teóricos de este sistema, ello podría indicar la presencia de otros componentes, como CH_4 , N_2 , u otros, tal como señala Velasco (2004).

Figura 12

Diagrama P-T para el Sistema CO_2 .



Fuente: Tomado de Velasco, 2004.



Es necesario recordar que en este sistema, se tiene que t_0 representa la temperatura ambiente (20°C); t_1 corresponde a la temperatura del punto triple; t_2' indica la temperatura en la cual se presenta un estado metaestable; y t_3 representa la temperatura de homogenización.

2.5.3.4. Sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$

Este sistema se distingue por estar presente en fluidos metamórficos y orogénicos, donde es fácilmente identificable visualmente la inclusión típica con tres fases a temperatura ambiente: líquido acuoso, líquido carbónico y vapor carbónico. Las curvas de disolución de CO_2 en soluciones acuosas con NaCl muestran formas similares a las del sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, pero la incorporación de NaCl reduce significativamente la capacidad de la solución acuosa para disolver el CO_2 . Por ejemplo, a 250°C y una presión de 500 bar, el agua pura puede disolver un 14.3% en masa de CO_2 , mientras que solo un 4.1% en masa de CO_2 puede disolverse en una solución de $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ al 20% en masa (Takenouchi y Kennedy, 1965). En otras palabras, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, las soluciones con las composiciones mencionadas son homogéneas, pero al aumentar la concentración de uno de los dos solutos, ya sea NaCl o CO_2 , se dividen en una fase gaseosa empobrecida en NaCl y una fase acuosa pobre en CO_2 , enriquecida en NaCl .

El incremento del contenido de CO_2 en una solución acuosa de NaCl aumenta la presión de saturación y desplaza el punto crítico a temperaturas y presiones más elevadas. Por ejemplo, la temperatura crítica de una solución de $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ al 6% en masa, que es de 430°C , se eleva



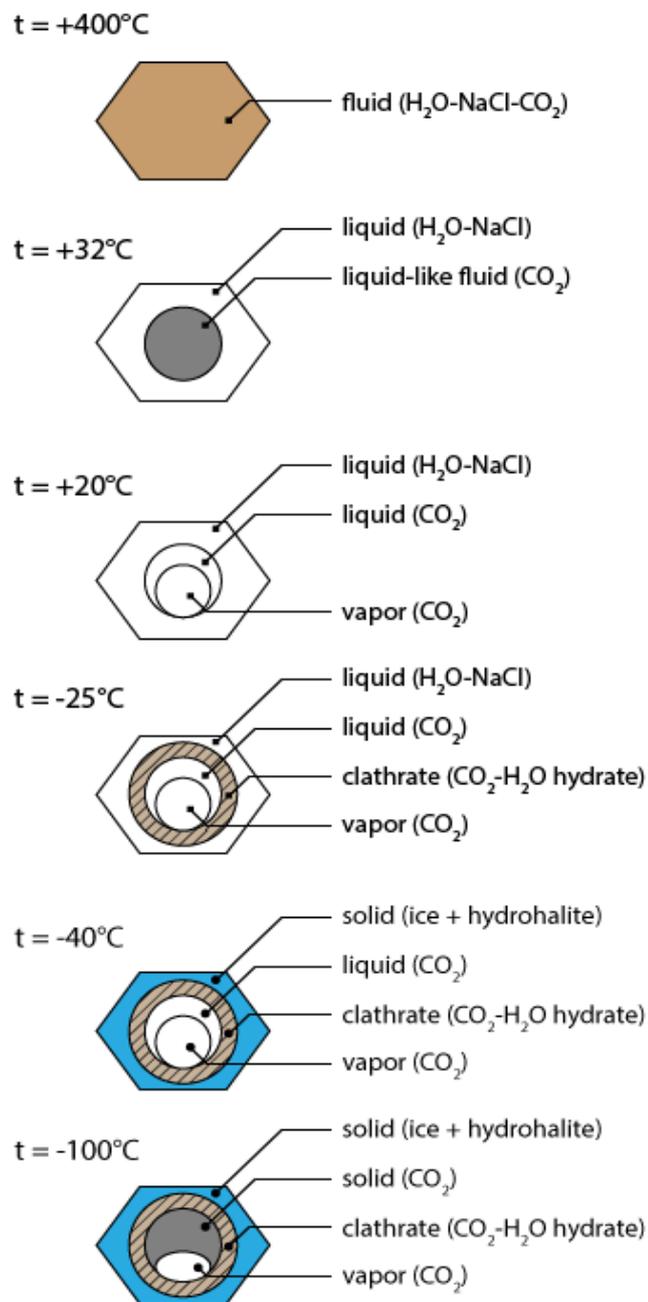
a 480 °C después de agregar un 9.7% en moles de CO₂ (Roedder, 1984).
Por consiguiente, las soluciones H₂O_NaCl_CO₂ pueden existir en un estado heterogéneo incluso a temperaturas superiores a 400 °C y presiones superiores a 2 kbar, especialmente en condiciones metamórficas.

A continuación, se presenta la evolución de una inclusión fluida con CO₂ durante la realización de la microtermometría.

Figura 13

Evolución de Fases en Función de la Temperatura en el Sistema

H₂O-NaCl-CO₂.



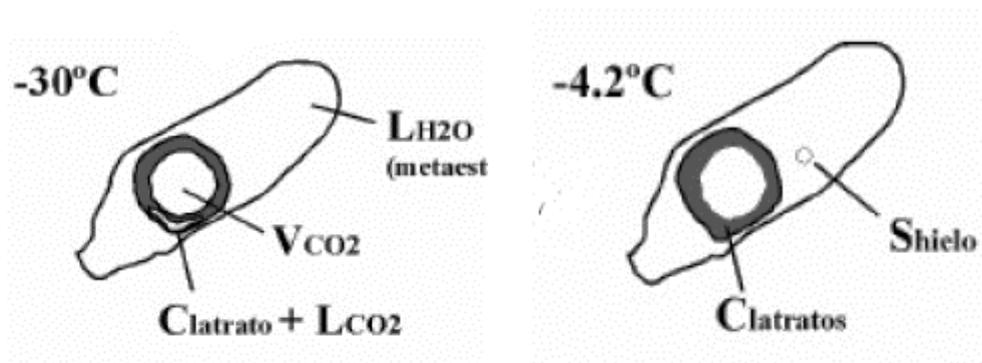
Fuente: Tomado de Dubois, 1992.

2.5.4. Clatratos

Se generan durante el proceso de enfriamiento de una inclusión acuosa con CO₂, cuando el gas interactúa con el hielo. Se identifican mediante la fórmula M.nH₂O, donde M representa el gas y n varía según el grado de relleno. Es relevante destacar que los clatratos son compuestos altamente puros que, al cristalizar a partir de fluidos acuosos salinos, segregan las sales de su estructura. Collins (1979) señala que esto ocurre porque parte del agua presente en la inclusión pasa a formar parte del clatrato, lo que resulta en un aumento del porcentaje de sales en la solución acuosa remanente de la inclusión. Este fenómeno se refleja en temperaturas de fusión del hielo anormalmente más bajas de lo esperado. Por lo tanto, esta temperatura puede ser incorrecta para calcular la salinidad real de la inclusión cuando están presentes clatratos. Según el método propuesto por Collins (1979), la salinidad para estos sistemas H₂O-NaCl-CO₂ se determina a partir de la temperatura de fusión de los clatratos (T_{fCl}), siempre y cuando esta fusión ocurra en presencia de CO₂L y CO₂V.

Figura 14

Bosquejo de Clatratos.



Fuente: Tomado de Velasco, 2004.



2.5.5. Inclusiones Fluidas en Exploración Minera

A través del estudio de inclusiones fluidas se puede obtener la siguiente información:

- Las temperaturas mínimas de formación de un yacimiento mineral.
- La salinidad de los fluidos mineralizantes.
- La evolución temporal y la zonación espacial de la temperatura y la salinidad.
- Mecanismos de precipitación mineral.
- La existencia de pulsos hidrotermales de diversa índole.
- La presencia de canales de alimentación en un depósito hidrotermal.
- La migración de salmueras a través de una cuenca sedimentaria.
- La posición de la paleosuperficie o del paleonivel freático bajo presión hidrostática.
- La tipología o subtipología a la que puede pertenecer una mineralización concreta.

A continuación, se detalla alguna de las aplicaciones más resaltantes de las inclusiones fluidas en depósitos minerales:

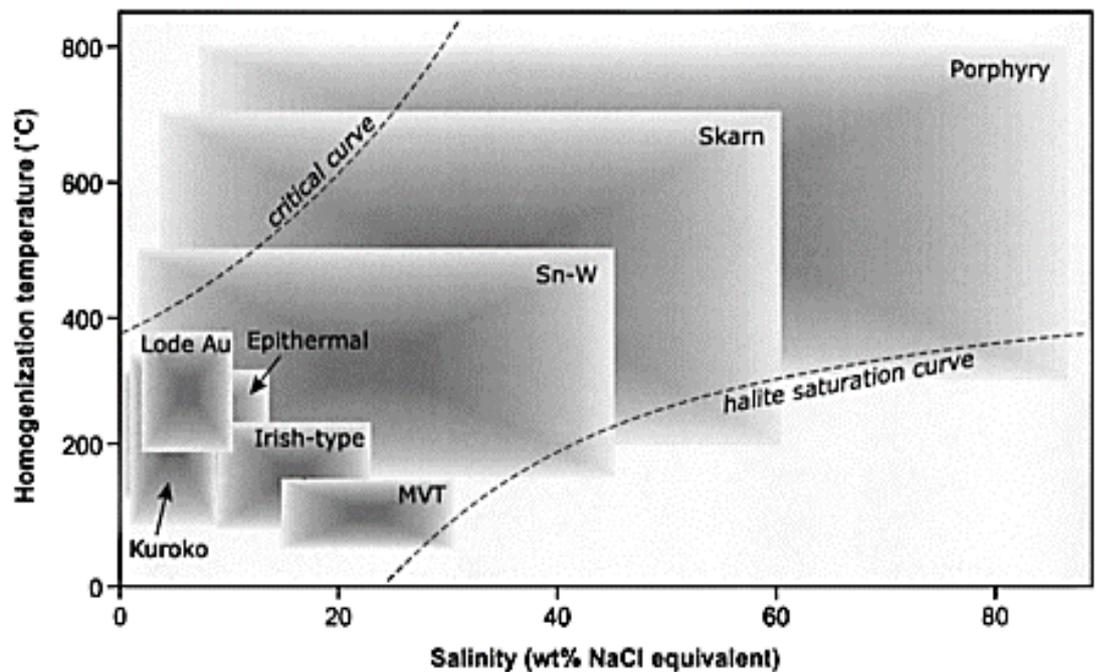
2.5.6. Determinación de tipologías de depósitos minerales

La aplicación más rápida y practica radica en la relación empírica de la temperatura de homogeneización y salinidad, los cuales se plotean en el diagrama

de Wilkinson (2001) (ver figura 15), donde se muestra diversas regiones orientativas para la tipología de yacimiento minerales, los cuales siempre deben ser complementados con el estudio petrominerográfico y más aun con la información de campo.

Figura 15

Ejemplo de Diagrama de Clasificación de Yacimientos



Fuente: Tomado de Wilkinson, 2001.

2.5.7. Identificación de temperaturas favorables a la presencia de mineralizaciones

Es posible relacionar un rango de temperaturas obtenidas con la presencia o ausencia de mineralizaciones económicas a manera de guías de exploración a escala de distrito o yacimientos adyacentes localmente, sin embargo, estas asociaciones preferenciales son empíricas, lo cual debe ser complementado con



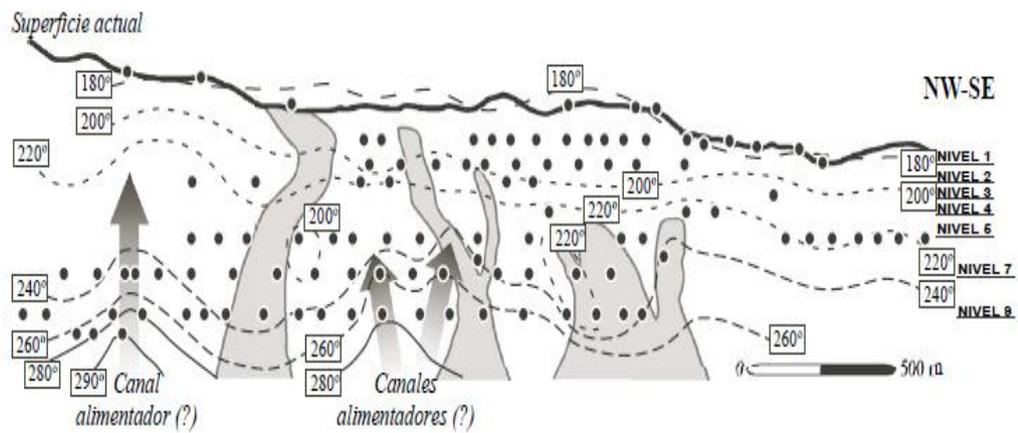
datos mineralógicos, estudios petrográficos y microtermometría bien detallada. Por ello no siempre se cumplirá esta relación así ya lo mencionaba Camprubi (2010).

2.5.8. **Identificación de canales de ascenso de fluidos**

La identificación de canales de ascenso de fluidos hidrotermales está determinada por patrones de isothermas, así lo menciona Camprubí (2010), que definirán la zonación térmica de los yacimientos, estos canales o fuentes de alimentación preferencial se reconocen al observar domos térmicos (según el trazado de las isothermas) a cuya elevación en otras áreas se encuentran isothermas de menor temperatura (Fig. 16). Como regla general se infiere que cuanto más pronunciado es el domo térmico, será una evidencia de la existencia de un canal de ascenso hidrotermal preferencial. Mientras más pronunciado sea el domo térmico que es definido por el trazado de isothermas. Para tener una certeza en la determinación de patrones isotérmicos, la zonación del depósito en términos de secuencia temporal será muy importante, solo así se podrá plotear la data microtermométrica a cada etapa de formación del yacimiento; sin embargo, suele pasar que no se logra encontrar similitudes en los isothermas de las diferentes etapas, ello no implicará la validez o invalidez de la data.

Figura 16

Isotermas Construidos a Partir de las Temperaturas de Homogeneización.



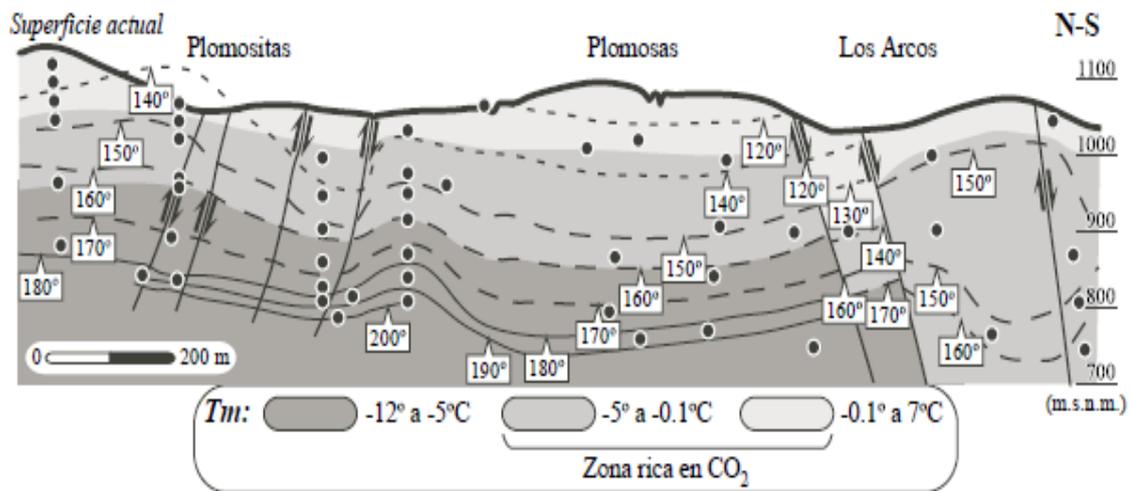
Fuente: Tomado de Camprubí, 2010.

2.5.9. Zonaciones composicionales

Mediante la determinación de la salinidad y cantidad relativa de CO₂ o CH₄, etc. es posible realizar zonaciones composicionales a escala de distrito minero, con ello se podrá definir la mezcla de fluidos cualesquiera (Fig. 17). Para caracterizar la evolución de fluidos hipogénicos ascendentes, Camprubi (2010) menciona que estos pueden ser modificados por la circulación de aguas meteóricas relativamente frías, aguas calentadas por vapor en la parte superior de los depósitos epitermales, o de la mezcla profunda de fluidos magmáticos con aguas meteóricas de circulación profunda en pórfidos metalíferos y skarns. No es suficiente definir la evolución del fluido solo con la microtermometría, más bien debe apoyarse con los criterios geológicos regionales y la geoquímica de isótopos estables de O, H, C o de gases nobles.

Figura 17

Ejemplo de Zonación Composicional para Inclusiones Con CO₂.



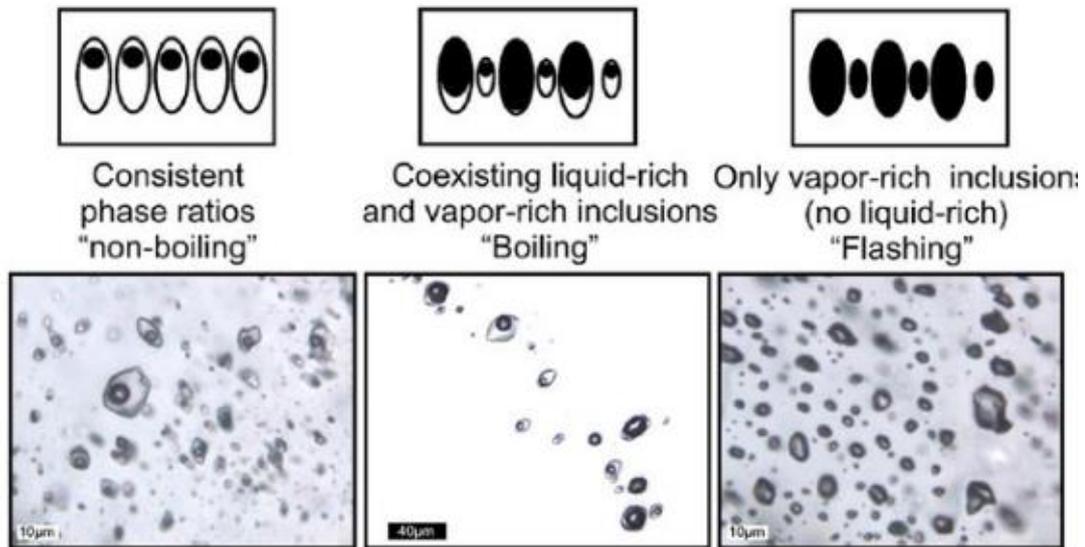
Fuente: Tomado de Camprubí, 2010.

2.5.10. Mecanismos de precipitación de metales: Ebullición

La ebullición es el proceso más importante que ocasiona la deposición de metales en muchos yacimientos minerales, generalmente en sistemas epitermales. La evidencia de los procesos de ebullición señalara posibles zonas de alta ley, así lo menciona Camprubí y Albinos (2006). Un indicio predominante de ebullición desde el punto de vista petrográfico es la coexistencia de IF tipo líquido y vapor (Fig. 18), además se puede dar por la existencia de inclusiones todas ricas en vapor.

Figura 18

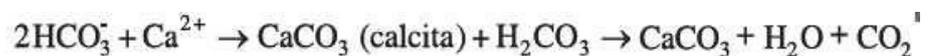
Ensamble de Inclusiones Fluidas Mostrando Ebullición.



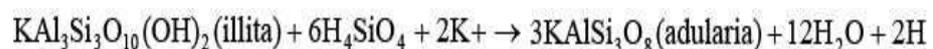
Fuente: Tomado de Moncada, 2011.

Además, Camprubi y Albinson, (2006) mencionan que existen evidencias mineralógicas y texturales de ebullición:

1. Presencia de calcita hojosa, reemplazada por cuarzo: originada por la pérdida de CO₂, y la subsiguiente saturación en calcita:



2. Presencia de adularia: causando un aumento de pH debido a la pérdida de CO₂, pasando del campo de estabilidad de la illita al de la adularia, según la reacción:



Dong y Morrison (como se citó en camprubí y Albinson, 2006), indican que la sola presencia de adularia, no asegura la ebullición, aun así, la morfología



típica debería ser pseudoromboédrica y pseudoacicular, para asumir zona de ebullición.

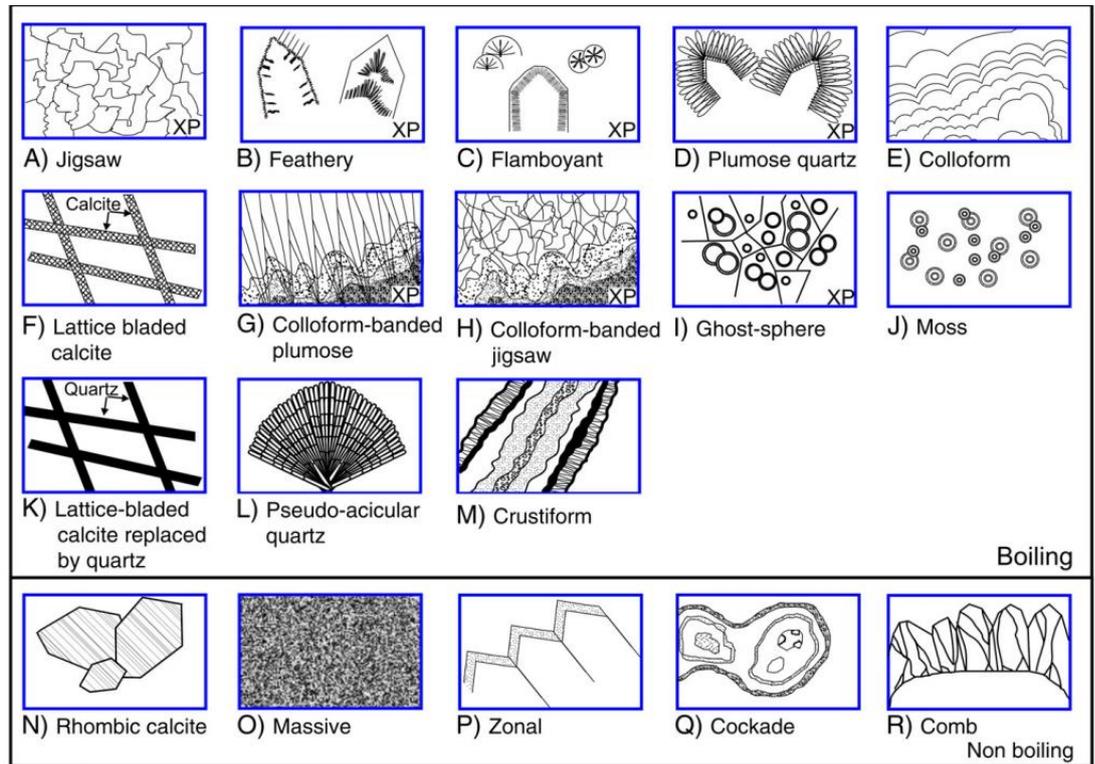
3. Presencia de truscottita (silicato de Ca y Al hidratado): puesto que, es estable sólo cuando la concentración de sílice excede la saturación en cuarzo, este mineral ha sido hallado con menas de oro de alta ley.

4. Presencia de sílice amorfa o de calcedonia: indicará que se ha producido un enfriamiento brusco del fluido entre 100 y 190°C (White y Hedenquist, 1990), y una sobresaturación de sílice en el fluido.

La ocurrencia de brechas hidrotermales en ambientes epitermales se acepta como evidencia de ebullición, dado que el aumento de la presión influyente de una vena puede provocar fracturas hidráulicas, ocasionando una caída repentina de la presión.

Figura 19

Texturas de Calcita y Sílice en Depósitos Epitermales.



Fuente: Tomado de Moncada, 2011.

Las texturas A – M son características de una deposición rápida, como puede ocurrir durante la ebullición, mientras que las texturas N – R indican que los fluidos que precipitan el mineral no están en ebullición.

2.5.11. Mecanismos de precipitación de metales Mezcla de fluidos

La saturación del oro puede ser provocada por la mezcla de los fluidos hipogénicos con aguas frías marginales o con aguas freáticas calentadas por vapor o si son de carácter ácido-sulfatado como carbonatado (ricas en CO_2), así lo refiere Hedenquist (como se citó en Camprubi y albinson, 2006), del mismo modo indica que la mezcla de fluidos, es muy importante cuando es restringido a partes someras de sistemas epitermales, a excepción de zonas con relieves pronunciados,



donde estas aguas pueden penetrar hasta grandes profundidades a lo largo de fracturas. El fluido hipogénico puede perder su potencial mineralizante si previamente ha sufrido ebullición extensa antes de su mezcla con aguas superficiales.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de investigación es de tipo Descriptivo, ya que implica la descripción de los afloramientos de roca en las proximidades de la zona de estudio, así como la caracterización detallada de las vetas, incluyendo la identificación de la asociación mineralógica predominante en cada estructura. También involucra una petrografía minuciosa de la roca encajante, sus alteraciones, y la determinación de la orientación, buzamiento y espesor de las estructuras mineralizadas. Asimismo, es de tipo Explicativo, dado que a partir de la descripción petromineralógica de las distintas formaciones litológicas y estructuras mineralógicas, junto con el análisis de las inclusiones fluidas, se realiza una interpretación con el fin de comprender mejor la presencia de oro en las diversas estructuras de cuarzo.

“Para facilitar la gestión de la información generada, este proyecto se divide en tres etapas principales: la recopilación y revisión bibliográfica, el trabajo de campo y los análisis y estudios de laboratorio. Cada una de estas etapas se describe detalladamente a continuación en los párrafos siguientes”.

3.1. RECOPIACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Boletines e informes:

- Boletín Geológico del cuadrángulo de Corani y Ayapata, hojas: 28-u y 28-v, serie A., publicados por INGEMMET.



- Reporte técnico N° 43-101 del 2012 y el formulario de información anual del 2016, emitido por la Minera IRL Limited, actual propietario de las concesiones mineras de Ollachea.
- Informe final del área de geología-región Puno, enmarcado dentro del proyecto “Desarrollo de capacidades para el ordenamiento territorial de la región Puno”.
- Informe respecto a la metalogenia de la cordillera oriental-sectores sureste y norte del Perú, por Michael Valencia, especialista del INGEMMET.

Tesis de pregrado:

- Comportamiento estructural de la formación Ananea en la zona del proyecto Ollachea-Carabaya-Puno, elaborado por Alian Vilca, UNA-2012.
- Geología económica del proyecto Ollachea, distrito de Ollachea-Carabaya-Puno, elaborado por Edgar David Luque Condori, UNA. 2013.
- Mejoramiento de la producción mediante el uso de estrategias operativas en la construcción del túnel exploratorio Ollachea, elaborado por Gonzalo Benedicto Luna Huane, UNI. 2016

Artículos geológicos:

- Depósitos orogénicos y la faja estañífera en la cordillera oriental del sureste peruano, elaborado por especialistas del INGEMMET.
- Exploración de yacimientos de oro orogénico en la franja paleozoica inferior Ollachea-La Rinconada, Región Puno, por Yuri Valdivieso.
- Mineralización y geoquímica de los depósitos de la cordillera oriental del Sureste Peruano, elabora por INGEMMET.



- Caracterización geoquímica de la mineralización aurífera del yacimiento orogénico Ollachea en la Cordillera Oriental-Sureste del Perú, elaborado por Donald McIver, Yury Valdivieso y Juan Diego Rojas.

Finalmente, se realizó la fase de campo preliminar, que incluyó la cartografía y muestreo preliminar de la mineralogía de mena y de la roca caja. En ella se definen las zonas geográficas en las que se realizó el muestreo posterior, que van acorde a las estructuras mineralizadas y afloramientos en el área de estudio, el grado de exposición de las mismas y posibilidad de acceso.

3.2. ETAPA DE CAMPO

“Reconocimiento de campo, visitando la zona mineralizada de Balcón, Minapampa y Cuncurayoc, y los alrededores, además, se observó la presencia de minería artesanal; en todo el recorrido se reconoció las diferentes estructuras mineralizadas que afloran en la zona.”

“Preparación del plano geológico local, mostrando las diversas litologías y determinando la geometría de las estructuras mineralizadas, tomando rumbos, buzamientos y potencia. El cual se hizo recorriendo la zona de estudio desde el pueblo de Ollachea, hacia el Oeste pasando por la zona mineralizada, hasta la zona de Jupuna en la parte alta. De igual forma se hizo el recorrido tomando datos de campo respecto a los afloramientos de roca en la zona de Challu-uno y Puente San Francisco, aprovechando los cortes de carretera. De esta forma se fue limitando las zonas de contacto entre las diferentes formaciones; cabe resaltar que este plano se ha elaborado tomando como referencia el plano geológico local realizado por la empresa minera Kuri Kuyllu. Al mismo tiempo se fue registrando datos para la elaboración del plano estructural”.



“Toma de muestras, del mineral de mena, de la roca caja y de los afloramientos que se observaron en el recorrido del mapeo geológico, para su estudio petromineralográfico y de inclusiones fluidas. Dicho muestreo fue realizado principalmente en las labores más importantes con mayor presencia de mineral de la zona de Balcón, Minapampa y Cuncurayoc; así como también, en los afloramientos cercanos más representativos encontrados durante el mapeo geológico para caracterizar la litología alrededor de la zona de estudio. Se recolectaron 03 muestras de veta mineralizada para el estudio de Inclusiones de fluidos, de las cuales se realizaron secciones delgadas doblemente pulidas, en el área de Petrotomía del Laboratorio de Preparación de INGEMMET.”

“Selección y etiquetado de muestras representativas para la preparación y posterior realización de los respectivos estudios en el laboratorio, ya sean macroscópicos y microscópicos mediante el uso de equipo especializado.”

3.3. ETAPA DE LABORATORIO

“Esta etapa se realizó a través de diversas técnicas analíticas de laboratorio que permiten caracterizar la mineralogía mediante los diferentes equipos de vanguardia con los cuales cuenta el laboratorio de Petromineralogía de la Dirección de Laboratorios del INGEMMET:”

3.3.1. Técnicas Analíticas

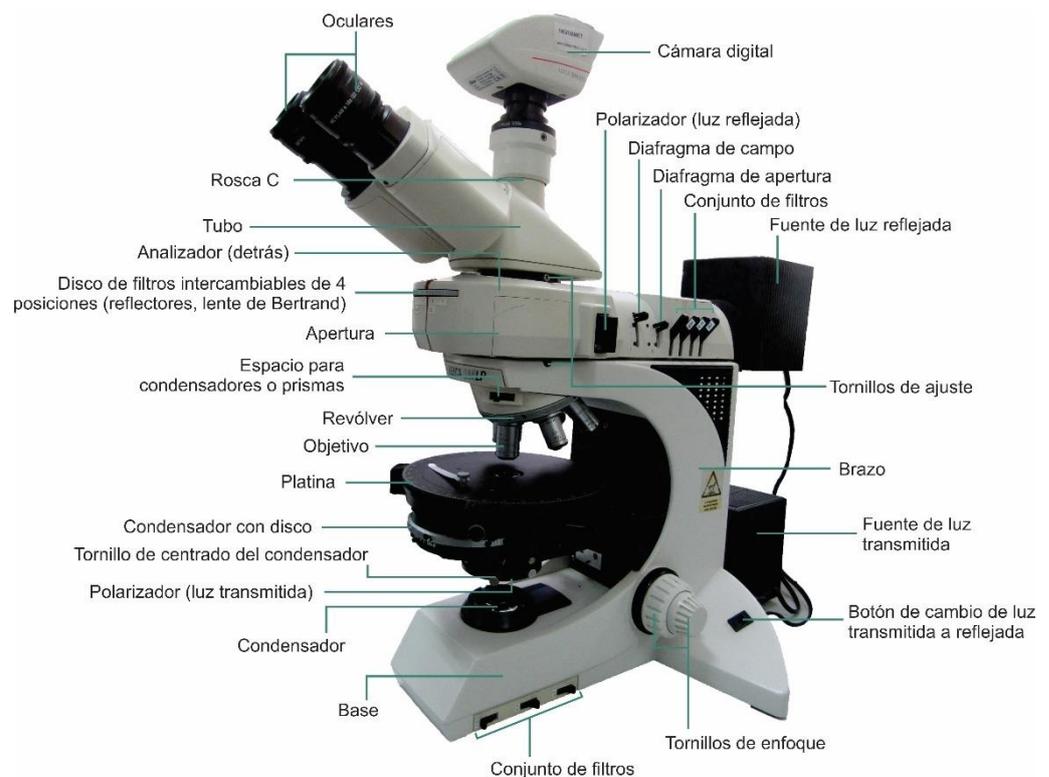
3.3.1.1. Microscopia óptica

“Consiste fundamentalmente en la magnificación de objetos difíciles de observar a simple vista, mediante la luz visible que trabaja con un sistema de lentes, en el que se produce la formación de imágenes

magnificadas. Para el estudio petrográfico y minerográfico de la roca caja y la asociación mineralógica, además del estudio petrográfico de las inclusiones fluidas, se trabajó con un microscopio óptico de polarización de marca “Leica DM2500P” con aumentos de 2.5X, 5X, 10X, 20X, 40X, 50X y 100X que funciona tanto con luz transmitida y reflejada; además este microscopio está conectado a una cámara digital marca “Leica MODELO: DFC450C” que sirve para la toma de fotomicrografías. A continuación, se presenta una fotografía del microscopio de polarización empleado en este estudio:”

Figura 20

Microscopio petrográfico de luz transmitida y reflejada, Leica DM 2500P.



Fuente: De LP-INGEMMET.



A. Estudio petrográfico

“Consiste en la observación microscópica de secciones o láminas delgadas de un espesor aproximado de 30µm que son preparadas a partir de un fragmento de roca, utilizando un microscopio petrográfico, mediante el cual se hace la descripción detallada de los minerales transparentes o formadores de rocas para clasificar la roca según las relaciones texturales y composición mineralógica. El registro estas características fueron registradas según la metodología descrita por el Laboratorio de Petromineralogía, de la Dirección de Laboratorios del INGEMMET, donde se toman en cuenta los siguientes aspectos, dependiendo del tipo de roca puede variar:”

- Clasificación modal de la roca.
- Descripción de cristales principales y accesorios.
- Descripción de la matriz.
- Descripción de minerales secundarios y/o alteración.
- Determinación de tamaños y porcentajes de los minerales.
- Identificación de las principales texturas.
- Descripción de fotomicrografías.

B. Estudio minerográfico

“Consiste en identificar y describir los minerales de interés económico o de mena, o también llamados opacos, se realiza a partir de una briqueta o sección pulida obtenida de la muestra en estudio, para su



estudio se aplicó la metodología del Laboratorio de Petromineralogía, de la Dirección de Laboratorios del INGEMMET, donde se toman en cuenta los siguientes aspectos:”

- Descripción de los cristales.
- Identificación de las principales texturas del mineral de mena.
- Determinación de la paragénesis de la asociación mineralógica.
- Descripción de fotomicrografías.

C. Estudio petrominerográfico

“Consiste en identificar y describir el ensamble mineralógico una muestra de roca, mediante una sección delgada pulida, donde se observa los minerales transparentes y opacos en una misma sección, para realizar una paragénesis más completa relacionando los minerales de interés económico y los minerales transparentes o formadores de roca asociados, de igual forma que en los anteriores la metodología a seguir para este estudios fue la del Laboratorio de Petromineralogía de INGEMMET, en el cual se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:”

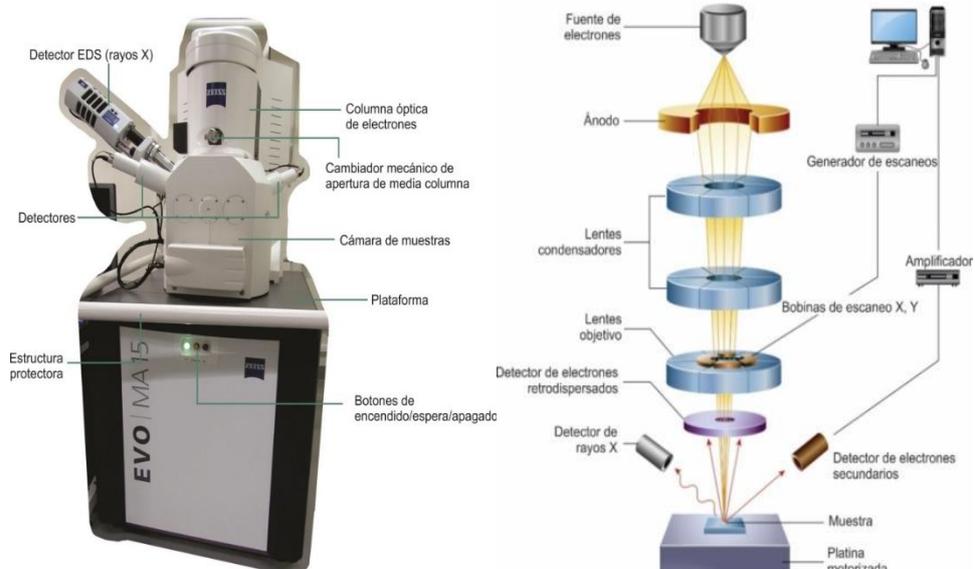
- Descripción de los cristales
- Identificación de las principales texturas.
- Determinación de la paragénesis de la asociación mineralógica.
- Descripción de fotomicrografías

3.3.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

“Consiste en la caracterización puntual de elementos químicos que componen a los materiales orgánicos e inorgánicos en estudio; además de producir magnificación a nivel nanométrico. El instrumento a utilizar en esta técnica es un microscopio electrónico de barrido, se basa en el uso de electrones en lugar de luz para formar imágenes, esto hace que pueda alcanzar mayores ampliificaciones. Uno de los varios detectores que acopla es el de energía dispersiva (EDS), su funcionamiento se basa en la liberación de rayos X, esta energía es característica de cada elemento, con lo que se obtiene un análisis composicional cuantitativa de la muestra. A continuación, se muestra imágenes del microscopio electrónico de barrido utilizado en el desarrollo del presente trabajo:”

Figura 21

Partes Externas e Internas del MEB, Marca Zeiss Evo Ma15.



Fuente: De LP-INGEMMET.



3.3.1.3. Difracción de Rayos X

“Consiste en el análisis mineralógico cualitativo y semicuantitativo de rocas, arcillas, arenas, minerales, sedimentos, aleaciones, etc. El principio de funcionamiento de la técnica es que cada material o mineral posee un difractograma característico, a partir de ello se realiza la identificación cualitativa del material en cuestión a través de la comparación con la base de datos ICDD, sin embargo, para el análisis semicuantitativo se realiza mediante el refinamiento de Rietveld de las fases encontradas. El equipo con el cual se realizó el análisis mineralógico fue de INGEMMET.”

- **Equipo:** Difractómetro Shimadzu, modelo XDR-6000.
- **Fuente:** Tubo de rayos X - Cu de longitud de onda, correspondiente a $K_{\alpha 1}$ -Cu, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$.
- **Rango angular de análisis (2θ):** Inicio: 3° Final: 44° Paso: 0.02°
Velocidad: 0.6 grados/min
- **Generador de Rayos X:** Voltaje de salida del tubo: 40 kV.
Corriente de salida del tubo: 30 mA
- **Tipo de detector:** Scintillation counter / Na

Figura 22

Difractómetro Shimadzu



Fuente: Del Laboratorio de Rayos X-INGEMMET

3.3.1.4. Espectroscopía de Reflectancia

“Consiste en la incidencia de una fuente de luz interna en la muestra, mediante ello se mide la variabilidad de los espectros característicos a diferentes rangos de longitud de onda, el resultado es representado a través de un espectro de minerales que sirven para la identificación cualitativa, el grado de cristalinidad y composición de acuerdo a la agudez que presentan los picos del espectro, ello es posible ya que el espectrómetro es sensible a las variaciones de composición y cristalización de cada especie mineral, de tal manera que se pueden determinar las condiciones de temperatura a la cual se formó el mineral, permitiendo así realizar mapas de alteraciones y grado de cristalinidad.

Generalmente esta técnica permite identificar minerales de alteración como son las arcillas y los oxidos.”

“El equipo utilizado fue un Espectrométero TerraSpec que permite analizar espectros en la región del Visible-Infrarrojo Cercano VNIR (380-1300nm) e Infrarrojo de onda corta SWIR (1300-2500nm), con el cual se obtiene datos sobre diferentes espectros electromagnéticos de cada mineral, estos fueron comparados con una base de datos que presenta el software del equipo.”

Figura 23

Equipo de Espectroscopia Modelo TerraSpec HI-RES 4. Marca ASD



Fuente: De LP-INGEMMET

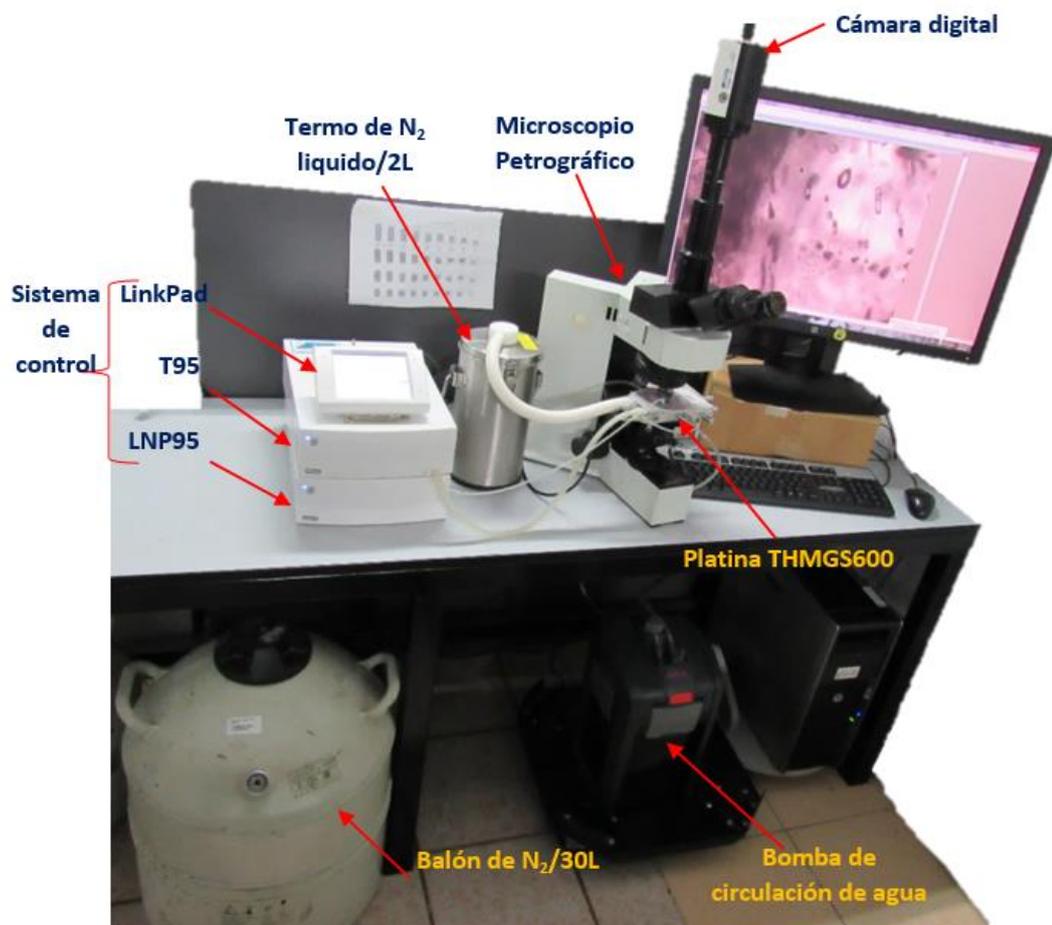
3.3.1.5. Microtermometría

“Consiste en la medición de temperaturas por calentamiento y enfriamiento de inclusiones fluidas con tamaños micrométricos en platinas diseñadas para este fin. En el presente estudio, se empleó una platina de

marca Linkam THMGS 600, el cual permite de forma controlada disminuir o aumentar temperaturas desde -190°C a 600°C , montada sobre un microscopio Olympus BX60 con objetivos de 10x, 20x, 40X y 50x. La platina tiene porta muestra de placa de cuarzo, para ubicar las muestras de hasta 1cm de diámetro, con la finalidad de observar la temperatura de homogeneización y fusión respectivamente. Así mismo esta platina permite desplazar la muestra solo en el eje X y Y, mas no se puede girar como en una platina convencional.”

Figura 24

Equipo de Inclusiones Fluidas



Fuente: De LP-INGEMMET“



Presenta los siguientes accesorios:

- Sistema de control Linkpad T95/PE95.
- Bomba de circulación de agua ECP, de 7.4 litros
- Estación de control de temperatura/ platina Linkam THMGS600.
- Sistema de bomba de nitrógeno LNP.

En síntesis, el estudio de inclusiones fluidas este dado por los siguientes procesos:

- Preparacion de la sección delgada doblemente pulida con un espesor aproximado de 100 μm .
- Estudio Petrográfico de inclusiones fluidas
- Desmontaje de la sección delgada doblemente pulida
- Fragmentación de la sección delgada doblemente pulida
- Microtermometría de inclusiones fluidas
- Cálculos microtermométricos
- Interpretación de resultados

3.3.2. Metodología para el estudio de inclusiones fluidas”

3.3.2.1. Estudio Petrográfico de Inclusiones Fluidas

“El estudio petrográfico es el inicio para la identificación detallada de las diferentes poblaciones de inclusiones de tal manera que sean una verdadera representación del fluido característico del proceso. Por lo tanto, para garantizar la representatividad de la inclusión, es necesario realizar



un estudio petrográfico adecuado que seleccione las inclusiones representativas y evite la tentación de centrarse únicamente en las inclusiones fluidas más estéticamente bellas, mejor formadas o más grandes. Un estudio petrográfico minucioso y sistemático de las inclusiones fluidas es clave para la toma de decisiones futuras, evaluaciones y/o interpretaciones (Roedder, 1984)”.

“Goldstein & Reynolds (1994) y Goldstein (2003) definieron a un grupo de IF como familias de inclusiones fluidas (FIA, del inglés Fluid Inclusion Assemblage), que representan una asociación de IF seleccionadas petrográficamente con origen común, simultaneidad y mismas condiciones físico-químicas, con el fin de facilitar el control más eficaz de los valores medidos.”

“Durante el estudio petrográfico se debe marcar las zonas o campos de interés en la sección delgada doblemente pulida (s.d.d.p), estos deben estar asociados con la mineralización económica y teniendo en cuenta los diferentes eventos de mineralización que pudieron haberse dado, evidenciado por la presencia de cuarzo con distintas texturas o presencia de venillas. La elección de estos campos debe apoyarse en los estudios petrominerales de las muestras elegidas para el estudio de IF.”

“Aspectos a tener en cuenta durante el estudio petrográfico de inclusiones fluidas, son los siguientes:

- Presencia y relaciones espaciales de inclusiones fluidas, con su respectiva identificación de los minerales que las contienen.



- Determinación de la morfología, tamaños de las IF, número de inclusiones, tipo y cronología con respecto a los eventos geológicos.
- Delimitar familias (poblaciones) de IF, como unidades fundamentales del estudio petrográfico.
- La identificación de los componentes de las IF que pueden ser fase vapor, líquidos y minerales atrapados e hijos.
- Estimación del grado de relleno, el porcentaje de vapor respecto al contenido de la IF.
- Identificación de cambios post-atrapamiento de las IF.

Además, de lo anterior es muy importante realizar la clasificación de las IF de acuerdo a su origen:”

3.3.2.2. Identificar las inclusiones fluidas según su origen

Primarias (IF tipo P): “

- Se ubican paralelamente a las caras de crecimiento del cristal hospedante, demarcadas según los planos de zonación o cambios de coloración de una zona a otra.
- Presencia de IF distribuidas aleatoriamente en las tres direcciones espaciales, sin embargo, este criterio puede ser relativo cuando alrededor existen abundantes IF secundarias.
- Inclusiones aisladas y dispersas, donde la distancia entre una y otra debería ser mayor a cinco veces el diámetro medio de las IF.



- Sus tamaños son bastante grandes en comparación al tamaño de las IF secundarias.

Secundarias (IF tipo S):

- Se presentan agrupadas y generalmente orientadas según la dirección de microfisuras que pueden cortar el borde del cristal o la exfoliación.
- Presentan formas irregulares con tamaños variables, modificadas pos-atrapamiento y en general muy pequeñas.

Pseudosecundarias (IF tipo PS):

- Ocurren ligeramente orientadas con formas irregulares atrapadas en fracturas discontinuas que terminan antes de llegar al borde del cristal hospedante.
- Se encuentran en zonas de crecimiento del cristal.

3.3.2.3. Desmontaje de la sección delgada doblemente pulida.

Consiste en retirar la sección delgada doblemente pulida del vidrio portaobjetos, con lo cual se tendrá listo la sección para el estudio microtermométrico.

Se mencionan los pasos a seguir para desmontar la sección d.d.p.:

- Desmontar o retirar la sección d.d.p del vidrio portaobjetos, colocándola a una estufa la cual estará a 40°C, observando la sección constantemente.



- Pasado 1 minuto aproximadamente, con una pinza u objeto puntiagudo, deslizar la sección del porta objetos.
- Colocar las secciones d.d.p., en un recipiente con acetona concentrada, esta tiene que estar al 60 % de pureza, percatarse que la acetona cubra por completo las secciones.
- Dejar actuar la acetona por un tiempo aproximado de una hora a 1 día, ello dependerá del tipo de pegamento con el cual haya sido pegado las secciones durante la preparación, y también si la muestra esta alterada.
- Al cabo de una hora revisar las secciones, si ya se diluyo el pegamento por completo, si no fuera así ayudar a retirar el pegamento con un cúter, o con isopos, con mucho cuidado evitando romper la sección.
- Nuevamente colocar las secciones en acetona, después de media hora volver a revisarlas para retirar por completo el pegamento de la sección; para comprobar la óptima limpieza de la sección, usar el microscopio petrográfico para observa la sección y asegurar su limpieza total.
- El proceso termina finalmente cuando las IF en las secciones pueden ser observadas claramente bajo el microscopio.

Insumos y materiales

- Acetona concentrada
- Estufa



- Pinzas

3.3.2.4. Fragmentación de la sección delgada doblemente pulida

- Una vez limpias las secciones, volver a remarcar los campos de interés previamente seleccionadas en el estudio petrográfico, con el fin de fragmentarlas.
- Utilizar 4 vidrios portaobjetos, para fragmentar las secciones, de acuerdo a los campos ya marcados.
- Preparar estuches o sobres para almacenar cada uno de los fragmentos (campos), correctamente codificadas; además guardar la contramuestra de la sección, es decir remanentes de la muestra.
- Con los sobres que contienen los fragmentos de la sección, la preparación de la muestra habrá terminado, y finalmente estarán listas para los ensayos de microtermometría.

3.3.2.5. Estudio microtermométrico de inclusiones fluidas

La finalidad del estudio microtermométrico es realizar el calentamiento y congelación de las inclusiones fluidas. El material de partida son las secciones delgadas doblemente pulidas, previamente fragmentadas. Una vez obtenido los fragmentos o campos seleccionados en el estudio petrográfico, ya se puede realizar la congelación y calentamiento de las IF en la platina Linkam. Durante el proceso se registró las temperaturas a las que ocurren cambios físico-químicos en las IF. Además, según la temperatura del eutéctico se determinó que el fluido mineralizante corresponden al sistema H_2O-CO_2-NaCl , es decir son



trifásicas. El proceso inicia desde la temperatura ambiente, congelando la inclusión hasta los $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguidamente recuperando la temperatura ambiente y finalmente aumentar la temperatura de las IF hasta los 400°C aproximadamente, a continuación, se detalla lo anterior:

3.3.2.6. Medidas de temperaturas enfriamiento y calentamiento

Durante el enfriamiento hasta -120°C :

- Temperatura de 1ra congelación sucede al congelarse una porción del CO_2 , lo cual se observa entre los -30°C y -28°C como clatratos o hidratos de CO_2 ($\text{CO}_2 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$).
- Temperatura de 2da congelación de la fase acuosa (hielo+hidrohalita), aproximadamente entre -45 a -60°C .
- A temperaturas más bajas (-100°C), se da la 3ra congelación del resto de CO_2 líquido.

Durante el calentamiento hasta los $+400^{\circ}\text{C}$:

- Temperatura de fusión del CO_2 sólido, es decir la 1ra fusión, esta se encuentra alrededor de -56.6°C ($T_{f\text{CO}_2}$), que es el punto triple del CO_2 .
- Temperatura de fusión (T_m) del sólido acuoso ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$), 2da fusión, esta se encuentra alrededor de -20.8°C (temperatura del eutéctico), generalmente no es observable en este triple sistema.
- Temperatura de fusión de clatratos ($T_{f\text{clatr}}$), generalmente cercano a $+10^{\circ}\text{C}$, puesto que la temperatura de fusión del hielo no es



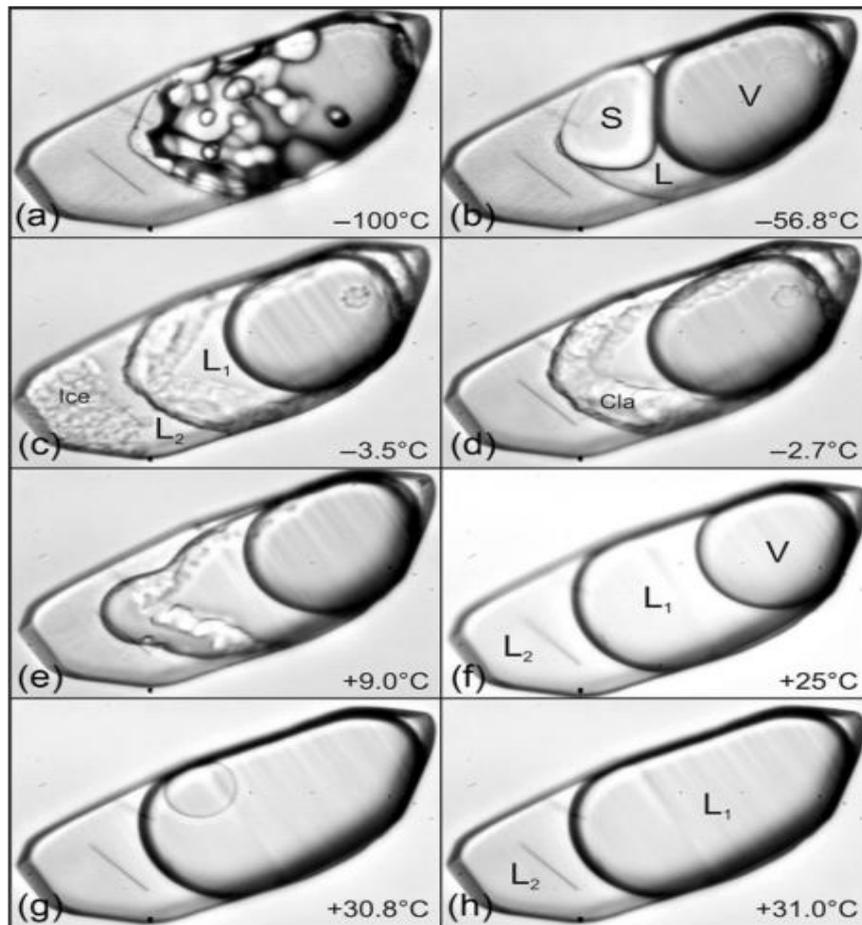
adecuada para este sistema. Aproximadamente a esta temperatura se muestra la fase líquida de CO_2 , englobando fase gaseosa.

- Temperatura de homogeneización parcial del CO_2 ($T_{h\text{CO}_2}$), ya sea a fase líquida o vapor, que estará muy próximo al punto crítico del CO_2 que es $+31.1^\circ\text{C}$.
- Temperatura de homogeneización total (T_h), se puede dar tres casos:
 - La T_h del CO_2 se da en el líquido acuoso (LH_2O).
 - La T_h del H_2O se da en del líquido carbónico (LCO_2).
 - La homogeneización crítica, que puede darse muy próximo al punto crítico del CO_2 ($+31.1^\circ\text{C}$).

También puede darse la decrepitación, donde “explosionan” las IF antes de llegar a su temperatura de homogeneización.

Figura 25

Cambios de Fase en una Inclusión con H₂O-CO₂-NaCl Durante la Microtermometría.



3.3.2.7. Cálculo de la salinidad en el sistema H₂O-CO₂-NaCl

Darling(1991) propuso la siguiente ecuación para determinar la salinidad en este sistema, el cual es válido para cálculos con 0-24mass% NaCl equivalente.

$$\text{Mass\% NaCl equivalente} = 0.00098241 (10-T_m) (T_m^2 + 45.385T_m + 1588.75)$$

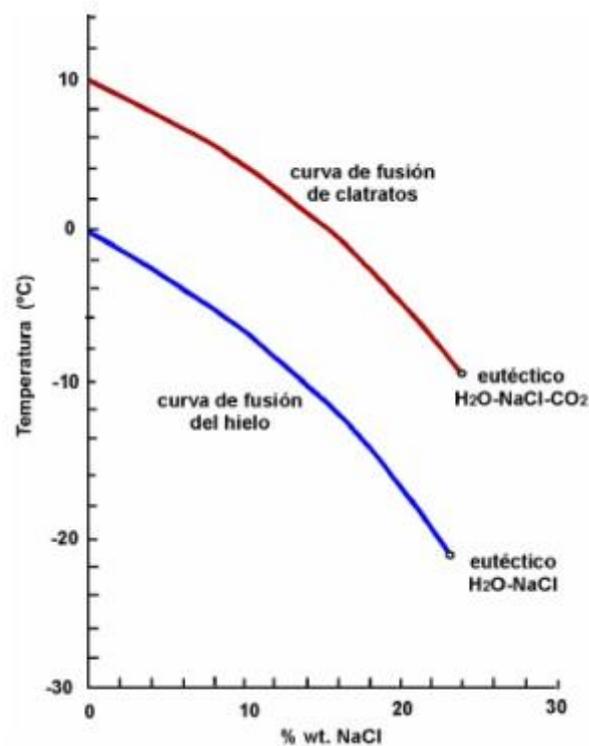
Donde:

T_m: temperatura de fusión del clatrato de CO₂.

De igual forma la salinidad se puede hallar en función a la temperatura de fusión de clatratos según el siguiente gráfico:

Figura 26

Gráfico para Hallar la Salinidad.



3.3.2.8. Cálculo de la densidad

Primeramente, se hará una estimación visual aproximada a temperatura ambiente sobre el volumen de las distintas fases que componen la inclusión fluida.

Entonces la densidad total de la inclusión (H₂O-CO₂-NaCl) sera:

$$\rho_{\text{total}} = V_{\text{CO}_2} * \rho_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O-NaCl}}$$



Donde

ρ_{total} : densidad total de la inclusión ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$).

ρ_{CO_2} : densidad del CO_2 .

$\rho_{\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}}$: densidad del líquido acuoso ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$), con salinidad muy bajo o despreciable, entonces $\rho_{\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}} = 1.0 \text{ g/cm}^3$.

V_{CO_2} : estimación del volumen ocupado por CO_2 (L+V).

$V_{\text{H}_2\text{O}}$: estimación visual del volumen ocupado por H_2O (L).

3.3.2.9. Cálculo del % de CO_2 :

$$\% \text{CO}_2 = V_{\text{CO}_2} * P_{\text{CO}_2} / P_{\text{TOTAL}} \text{ (wt. en peso)}$$

Convertir el resultado anterior en % molar de CO_2 , para realizar estimaciones de presión y profundidad; lo cual se realiza teniendo en cuenta lo siguiente: considerar la conversión para 1kg de solución, determinar el contenido molar del H_2O y recalcular a 100.

Peso molecular del CO_2 : $P_{\text{mCO}_2} = 44\text{g/mol}$

Peso molecular del H_2O : $P_{\text{mH}_2\text{O}} = 18\text{g/mol}$

Además, $\text{wt CO}_2 + \text{wt H}_2\text{O} = 100$

Por tanto:

$$\% \text{mol CO}_2 = \% \text{wt CO}_2 * 1000 / 44$$

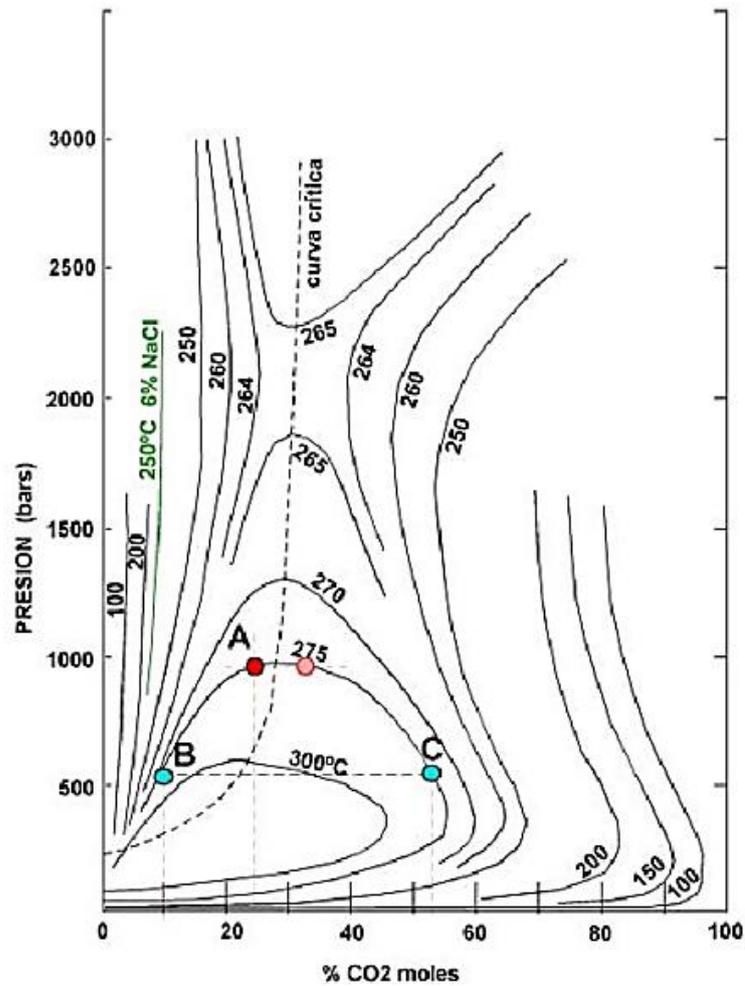
$$\% \text{mol H}_2\text{O} = \% \text{wt H}_2\text{O} * 1000 / 18$$

3.3.2.10. Cálculo de la presión:

Método 1: Sistema H₂O-CO₂

Figura 27

Diagrama para Determinar la Presión de Inclusiones Fluidos con CO₂.



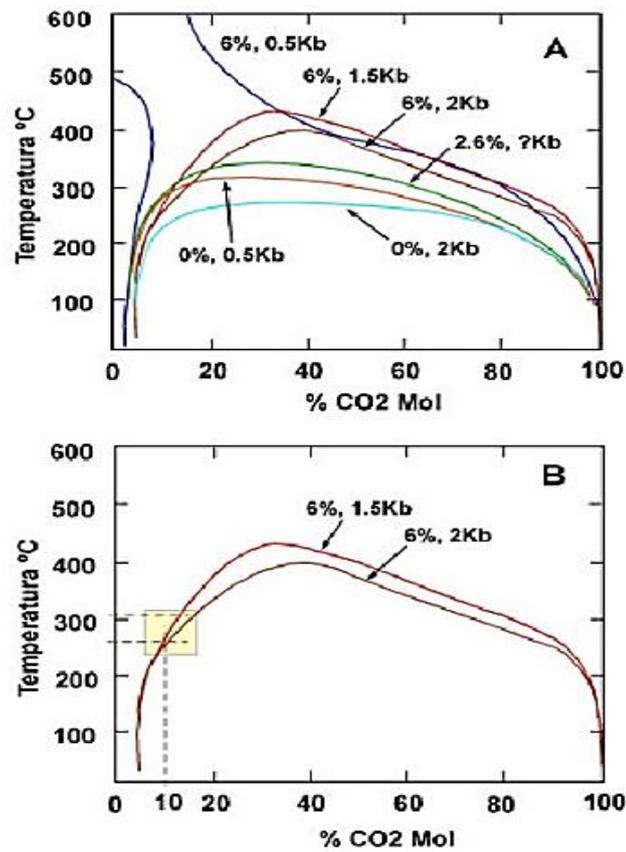
Adición de NaCl en el sistema H₂O-CO₂

El incremento de NaCl en el sistema genera una reducción significativa de la solubilidad del CO₂ (ver figura 28), donde se amplía el área de la región bifásica de inmiscibilidad, con mayor intensidad se

observa este cambio cuando la presión tiende a bajar tal como lo indica Velasco (2004).

Figura 28

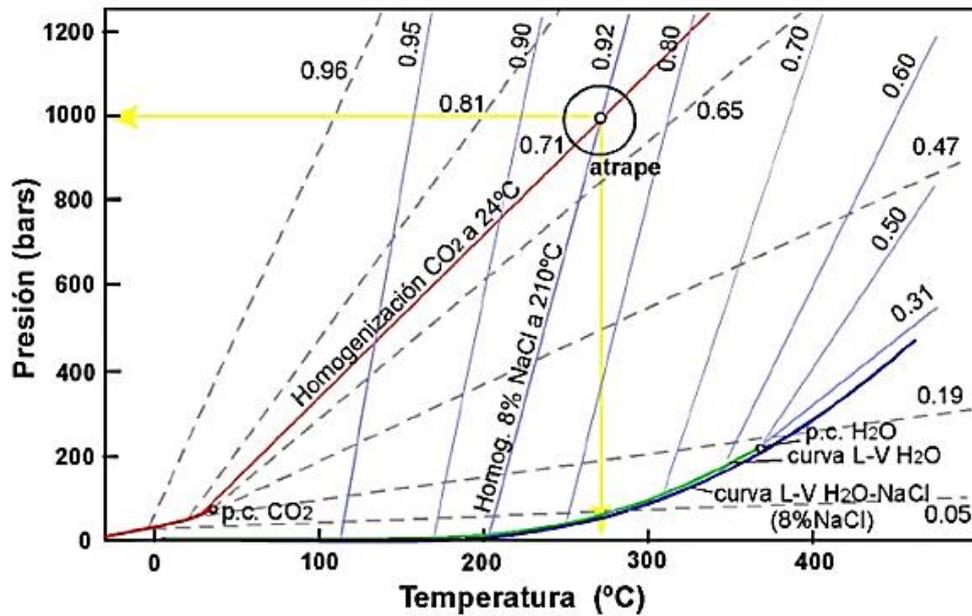
Variación de los Solvi en el Sistema H_2O-CO_2-NaCl .



Método 2, de la intersección de isocoras:

Figura 29

Diagrama P-T Ppara el Sistema H₂O-CO₂ con Isocoras Calculadas para el Fluido CO₂ y el Líquido Acuoso.

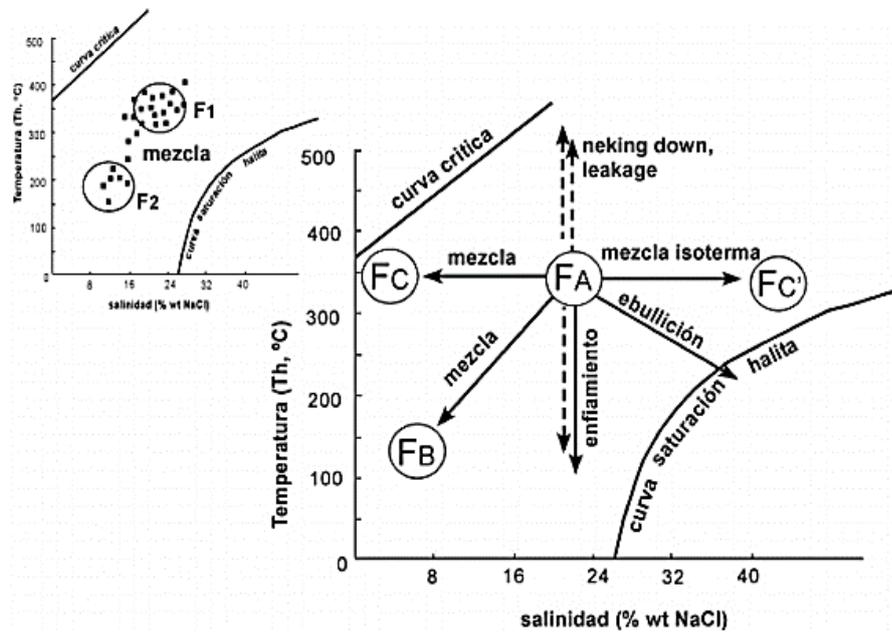


3.3.2.11. Diagramas para la interpretación de resultados

El diagrama de dispersión de temperatura vs salinidad permite visualizar el comportamiento de los datos obtenidos, donde se puede observar algunas tendencias de las familias de inclusiones fluidas, a partir de ello se podrá inferir si hubo mezcla, enfriamiento o ebullición del fluido (fig. 30).”

Figura 30

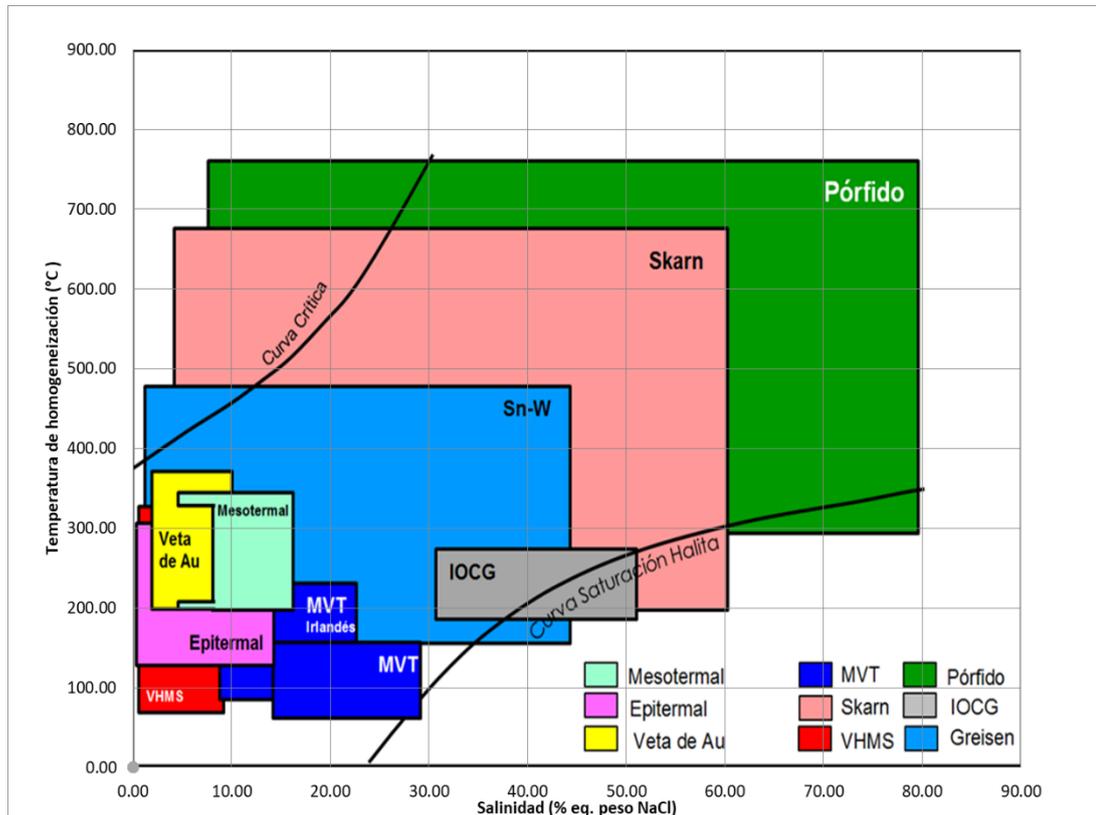
Diagrama para la Interpretación de Población de Datos de Inclusiones Fluidas.



Además, se puede plotear los datos obtenidos en el diagrama de la figura 31 en el cual se consignan los rangos genéricos de temperatura y salinidad para diversas tipologías de depósitos minerales.

Figura 31

Tipologías de Yacimientos.



Fuente: Modificado de Wilkinson, 2001.

3.4. ETAPA DE INTERPRETACIÓN-GABINETE“

Teniendo los datos representados y clasificados según histogramas y diagramas, además de los estudios petrográficos, minerográficos y alteraciones hidrotermales, se realizó las interpretaciones para responder el objetivo de la investigación que es determinar las características petrográficas, minerográficas, alteraciones hidrotermales y de las inclusiones fluidas del yacimiento aurífero de Ollachea; estas interpretaciones fueron sustentadas y/o apoyadas con observaciones de campo que finalmente sirvieron para elaborar la presente tesis sobre la caracterización petrominerográfica del yacimiento de oro de Ollachea”.



CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra en el Sureste de Perú, en la región de Puno, específicamente en la provincia de Carabaya y el distrito de Ollachea, ubicado a unos 260 km al norte de la ciudad de Puno, como se puede observar en la figura N° 32. El depósito minero está situado a 6.5 km al oeste de la localidad de Ollachea, con coordenadas aproximadas de 8 474 066m N y 339 175m E (sistema de referencia WGS 1984, zona 19 Sur), con elevaciones que oscilan entre los 2500 y 4600 metros sobre el nivel del mar. Esta área está atravesada por el río Oscco Cachi, al pie del cerro Joropiña y al norte del centro poblado de Asiento.

4.2. ACCESIBILIDAD

Al área de estudio se puede acceder según el detalle de la tabla N° 4.

Tabla 4

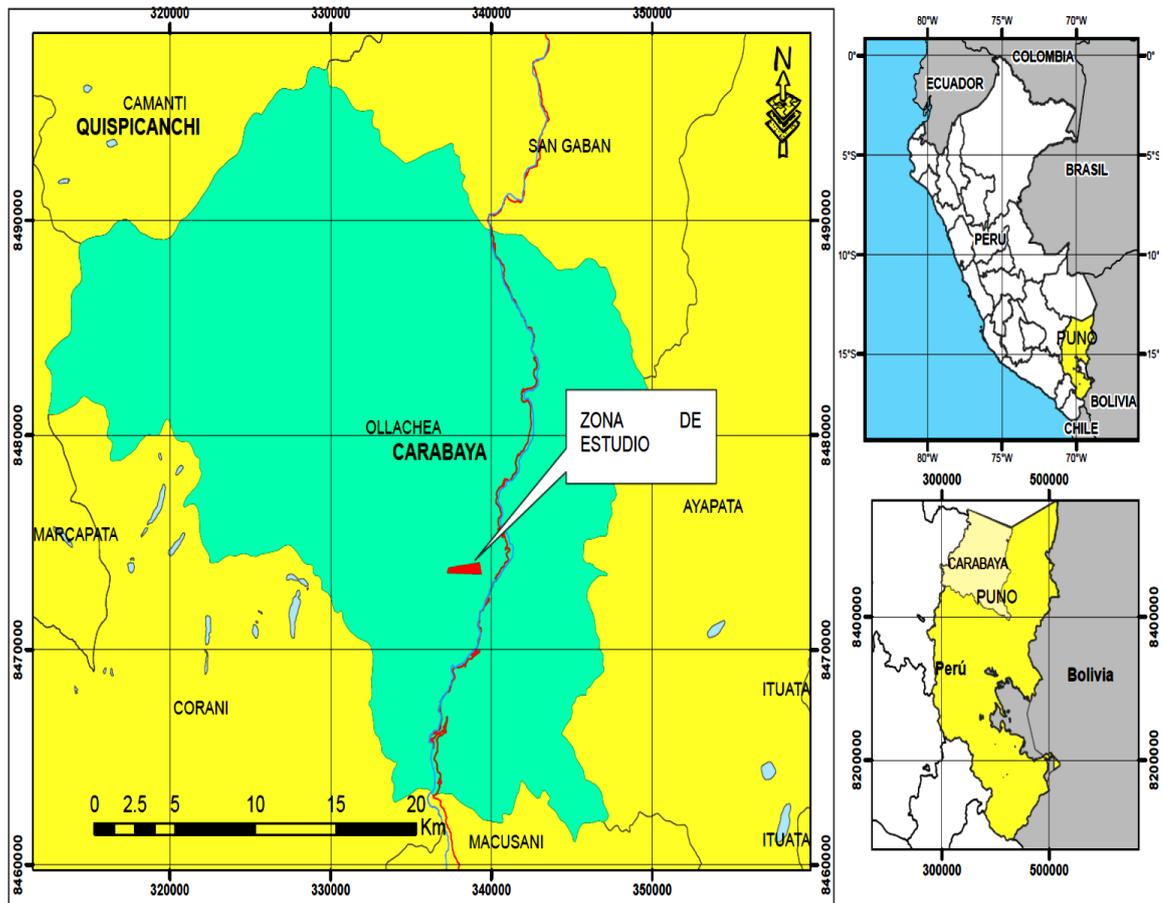
Vías de Acceso al Área de Estudio.

| VIA DE ACCESO | TIPO DE VIA | ESTADO | KM | TIEMPO | MEDIO DE TRANSPORTE |
|----------------------------|-------------|-----------|--------|---------|---------------------|
| Lima - Juliaca | Aérea | - | 1500.0 | 1.5 h | Avión |
| Juliaca - Ollachea | Terrestre | Asfaltado | 220.0 | 4 h | Auto |
| Ollachea – Zona de estudio | Terrestre | Afirmado | 6.5 | 20 min. | Auto |
| | | Total | 1726.5 | 5.50 h | |

Fuente: Elaboracion propia.

Figura 32

Mapa de Ubicación.



Fuente: Elaboracion propia.

4.3. FISIOGRAFIA“

El proyecto minero está ubicado en un valle de tipo V conformado por los sectores Trapiche-Cuncurayoc-Asiento-Oscocochi, rodeado por formaciones montañosas abruptas con pendientes elevadas hasta 70° característico de cordillera con topografía muy accidentada, sin embargo, hacia la zona de Asiento sus pendientes son mas bajas de hasta 45°.

Presenta un clima templado por ser parte de ceja de selva, con una media de precipitación anual de 1,230 mm/año, evaporación total anual de 614 mm, humedad

relativa de 86 %, y temperatura media de 12.49 °C, donde la temporada de mayor precipitación se da en febrero y marzo, iniciando tempranamente en noviembre y finaliza tardíamente en abril. Además, las temperaturas mas bajas llegan a 10 °C o incluso cercano a 0°C en junio y agosto. La presencia de nieve es poco común, mostrándose en las partes altas de Ollachea sobre los 4000 m.s.n.m generalmente en la zona de Padre Occo y áreas contiguas (Condori, 2015).”

Figura 33

Valles Tipo “V” al Noreste de Ollachea, en la Zona de Sayapiya.



4.4. HIDROGRAFÍA

“Como principal característica hidrográfica, el área de estudio está representado por el rio Ollachea, con dirección aproximada de Sur a Norte que pasa por el lado Este del pueblo de Ollachea, perteneciente a la cuenca del rio Inambari. Es originado gracias a la afluencia del rio Macusani y Corani aguas arriba, en la parte baja tiene afluentes del



rio Llucupampa, Calachaca, Oscoccachi, entre otras quebradas pequeñas, donde aguas abajo presenta un último afluente que es el río Chiamayo, a partir de ahí el río Ollachea cambia su denominación a río San Gaban. El río Oscoccachi es el que atraviesa las diferentes labores artesanales que se desarrollan en la zona de estudio, con dirección aproximada de Oeste a Este”.

4.5. **GEOMORFOLOGÍA**

“El área de estudio esta caracterizado por una geomorfología abrupta hasta zonas llanas localmente, donde se han identificado unidades morfológicas bien definidas desde montañas abruptas que limitan al sector de Oscoccachi, hacia el Sur el cerro Lomapata, hacia el norte el cerro Joropiña, entre ambos formando un valle de tipo V, además hacia el Este el cerro Ccosco Orcco y al Oeste la zona de Trapiche y Jupuna. Hasta zonas de terrazas fluviales localmente alrededores del río Oscoccachi y Ollachea, destacando el sector de Minapampa y Muyucpampa respectivamente. En general la zona de estudio está caracterizada por montañas abruptas, valles, terrazas fluviales, bofedales, laderas empinadas, factores antropomórficos como la exploración minera, trochas carrozables y la actividad del hombre”.

Figura 34

Sistema Montañoso de Pendientes Abruptas que Caracteriza las Zonas Altas de Ollachea.



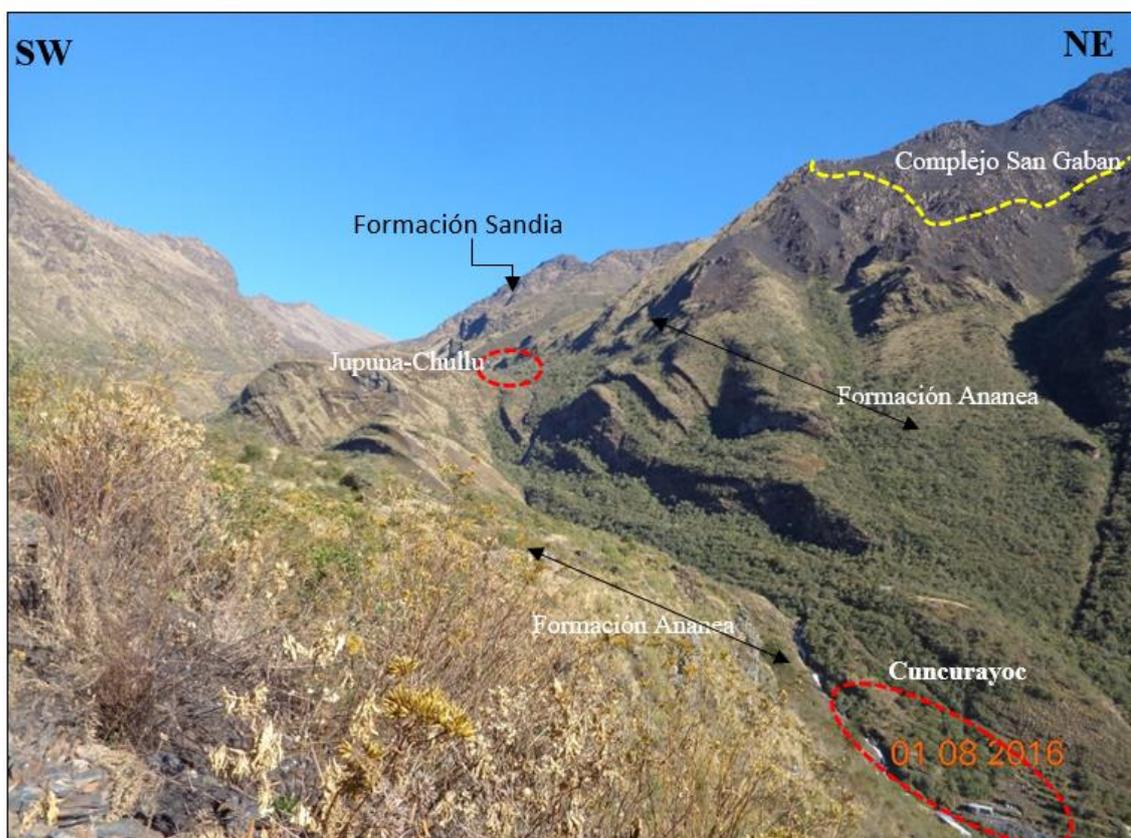
4.6. GEOLOGÍA LOCAL

“El depósito minero de Ollachea está relacionado con afloramientos rocosos sedimentarios metamorfizados del Paleozoico al Mesozoico, estratigráficamente (ver tabla N° 04) en la parte más baja se encuentra la formación Sandía, seguida por la formación Ananea, grupo Mitu y finalmente depósitos detríticos del Cenozoico, además estos se encuentran interceptados por intrusivos del complejo San Gabán y por las Sienitas Nefelínicas. La formación Sandía y Ananea, presentan mineralización de oro (Au) y cobre (Cu) asociados con sulfuros de hierro. Así mismo hubo bastante actividad tectónica, dada por esfuerzos compresivos y extensionales, que afectaron a las rocas del área de estudio, mostrándose zonas de cizallamiento crítico, plegamiento y fracturamiento. De forma

general la litología del depósito mineral de Ollachea está conformado por la formación Ananea que corresponde a una secuencia de pizarras negras con alto contenido de bitumen y de textura esquistosa, en algunas zonas alternados con areniscas finas cuarzosas metamorizadas. Es importante mencionar que la geología económica del área de estudio está caracterizada por la presencia de oro nativo asociado con sulfuros, los cuales se hallan en estructuras mineralizadas de tipo vetas, mantos y a asimismo como disseminaciones finas en la roca caja”.

Figura 35

Vista de la Formación Ananea y Sandia, Interceptados por el Complejo San Gaban, con Presencia de Anticlinas y Sinclinales.





4.6.1. **Paleozoico Inferior: Formación Sandia (Os-S)**

“Pertenece al sistema ordovícico, ocurren como franja de gran potencia con dirección SW-NE extendiéndose en continuidad de rumbo desde la zona de Jupuna hasta Challouno, además se observó zonas de contacto al SW con la Formación Ananea, originado por la falla Ollachea inversa, lo mismo sucede en la zona de Cuncurayoc - Lanlacu al NW de Ollachea. La litología que más predomina son las meta-areniscas cuarzosas de color gris oscuro, con orientación principal $15^\circ / 60^\circ$, aflora en la zona de Lanlacu y Jupuna, intercaladas con capas de pizarra. La formación está afectada por esfuerzos comprensivos que generaron plegamientos del tipo anticlinales y sinclinales con inclinación hacia el SW en la zona de Trapiche y Jupuna (Chullu). Esta formación fue interceptada por cuerpos intrusivos, cuyos afloramientos se observaron en la zona de Sonccoña, puente San Francisco y en Ccolpapampa”.

4.6.2. **Paleozoico Inferior: Formación Ananea (Sd-A)**

“Pertenece al sistema Silúrico-Devoniano, ocurren afloramientos con dirección de E-O extendiéndose desde el pueblo de Ollachea hacia la zona de Ucundaya prolongándose al cuadrángulo de Corani; se presenta plegada y fracturada, con foliación bien definida. Su litología corresponde a limolitas con indicios de estar metamorfozadas a pizarras con prevalencia del material bituminoso que le confiere un color negrusco de textura foliada. Además, según las perforaciones diamantinas realizadas por Minera IRL, se precisa la ocurrencia de paquetes de siltitas de coloraciones beige con 40 cm a 60 cm de espesor, intercaladas con paquetes de pizarras. En el sector de Cuncurayoc las perforaciones evidenciaron presencia de sills con litologías que pertenece a micro

granitos con indicios de estar silicificados, esta posee diseminación de piritita y pirrotita. Se encuentra afectada por metamorfismo regional, además por la falla Ollachea y Paquellusi originando una zona de cizallamiento en el valle del río Oscocachi. En el presente trabajo se ha recolectado cuatro muestras para realizar la descripción petromineralógica de esta formación”.

Figura 36

Afloramiento de la Formación Ananea en el Valle del Río Oscocachi, en la Zona de Cuncurayoc y Minapampa.



4.6.3. Grupo Mitu (Ps-Mi)

“Pertenece al Pérmico superior, se puede observar afloramientos al SW del pueblo de Ollachea en el sector de Chacapata (puente San Francisco) extendiéndose hacia la localidad de Macusani, donde su litología corresponde en su gran mayoría a lavas andesíticas de textura porfírica, presentando



fenocristales de plagioclasas, en una matriz afanítica con abundante impregnación de óxidos de hierro, en sectores se hallan alternadas con lavas afaníticas de coloración oscura. Así mismo la parte inferior se encuentra constituida por conglomerados polimicticos con clastos subangulosos de variada litología donde predominan las cuarcitas y pizarras, mientras que la parte superior se halla constituida por derrames lávicos”.

4.6.4. **Cuaternario: Coluvial (Q-Co)**

“Ocurren como acumulaciones depositadas en el fondo de los valles aledaños al pueblo de Ollachea, con mayor predominancia en el fondo de laderas hacia los márgenes del río San Gaban, constituidas por clastos de poco transporte con formas angulosos a subangulosos los cuales fueron depositados por procesos de erosión mecánica, son provenientes de la meteorización de los diversos afloramientos rocosos que rodean al área de estudio, tales como las sienitas nefelínicas, granitos, granodioritas, pizarras negras y cuarcitas, dispuestos en una matriz limosa y arcillosa combinadas con materiales orgánicos”.

4.6.5. **Intrusivo: Complejo De San Gaban (Pt-Mzg/Gr)**

“En algunos tramos de la carretera interoceánica de Ollachea a San Gaban se ha observado diversos afloramientos, su litología predominante son las fases dioríticas metamorfizadas (gneis dioríticos) con tramas de microdiorita, en la zona de Concurayuc se observa cantos rodados de granodioritas que provienen de la parte alta de Joropiña, así mismo en sectores se halla interceptado por diques de composición granítica, también se hallan débilmente metamorfizadas, así vez intruye a la formación Sandía generando zonas de metamorfismo de contacto, evidenciados en la parte alta del cerro Joropiña, en la zona de Ccoloyoc y en la

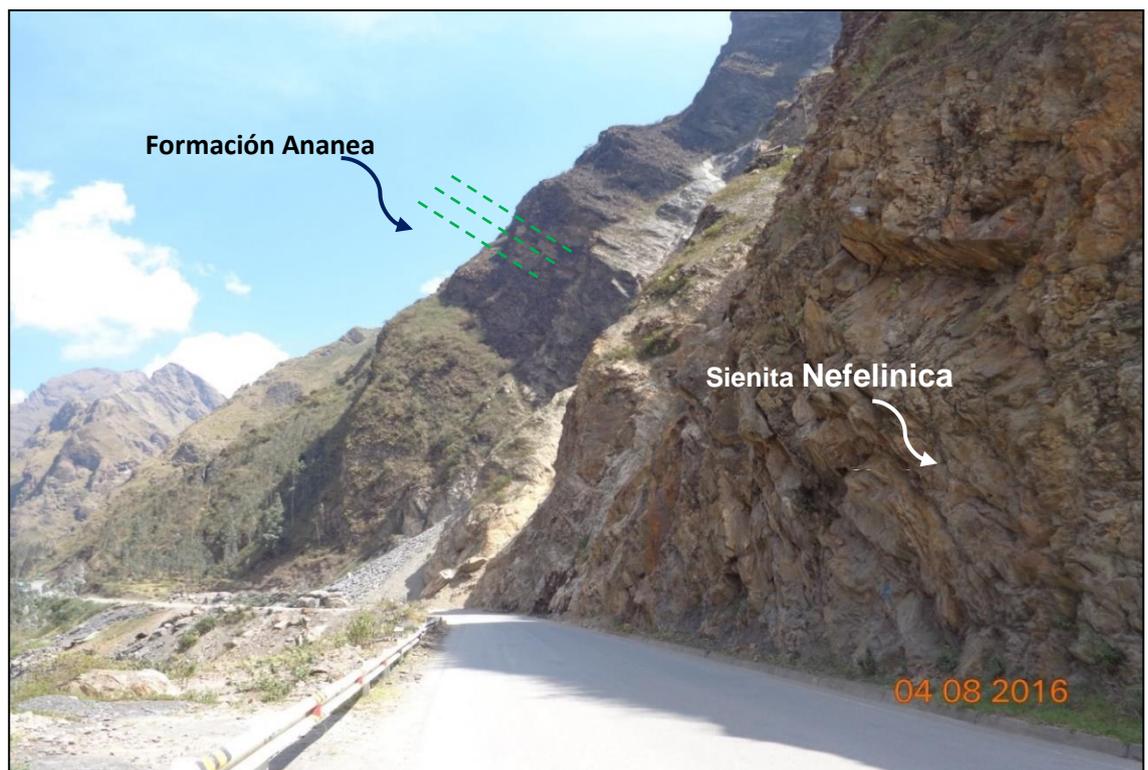
parte alta de Ccollpapampa en el sector de Jupuna, donde se ha observado afloramientos de esquistos de textura foliada con presencia de porfidoblastos semejantes a “motas” en matriz ricas en micas y cuarzo”.

4.6.6. Intrusivo: Sienita Nefelinica (Jm-Si)

“Pertenece al Mesozoico del sistema Jurásico interior – medio, se aprecia buenos afloramientos al SW del distrito de Ollachea, evidenciados por los cortes de la carretera interoceánica, en inmediaciones del puente San Francisco; ocurren como intrusiones que interceptaron afloramientos de pizarras correspondientes a la Formación Ananea, generando metamorfismo de contacto evidenciado por la presencia de porfidoblastos de andalucita. “

Figura 37

Afloramiento de la Sienita Nefelinica, en la Zona de Ccollpapampa.





“Se observa el macizo rocoso de la Sienita Nefelinica fuertemente fracturada, ocurren cortando las pizarras de la formación Ananea, además ocurren desprendimientos de rocas en el margen izquierdo del río Ollachea”.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERIZACIÓN PETROMINERAGRÁFICA POR UNIDADES ESTRATIGRAFICAS

A continuación, “se describen las formaciones geológicas que afloran en el área de estudio desde la más antigua hasta la más reciente, complementadas con la información de campo y estudios petrominerafícos, basados en diversas técnicas y métodos de análisis mineralógicos”.

Tabla 5

Muestras Analizadas por Unidad Estratigráfica.

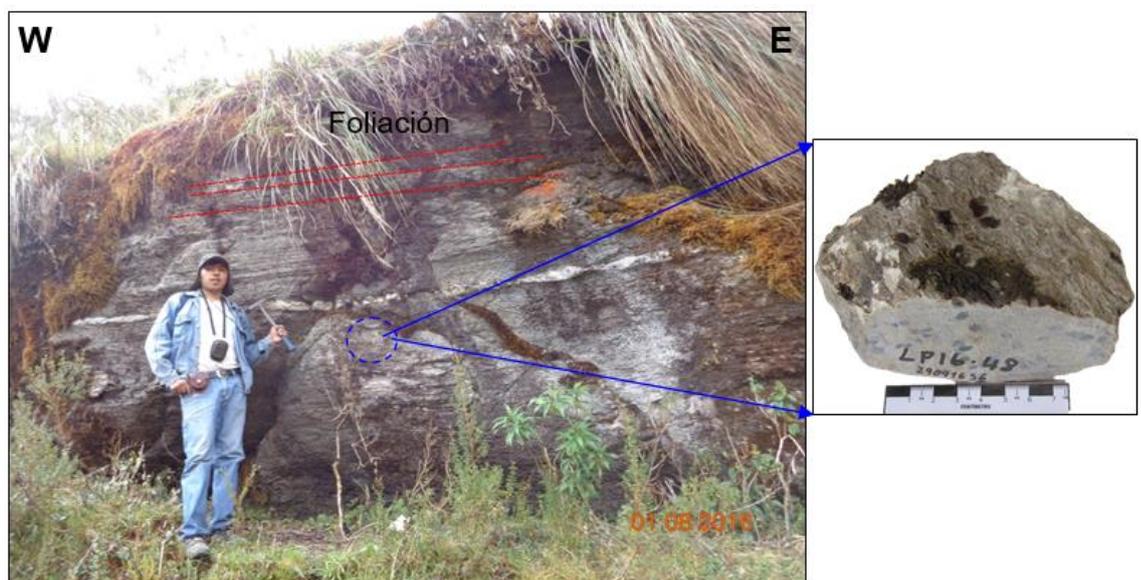
| Eratema | Unidad Estratigráfica | Muestras Analizadas | | |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|------------|
| Paleozoico Inferior | Formación Sandia (Os-S) | LP16-048 | | |
| | | LP16-049 | | |
| | | LP16-052 | | |
| | | LP16-053 | | |
| | | LP16-045 | | |
| | Formación Ananea (Sd-A) | LP16-047 | | |
| | | LP16-050 | | |
| | | LP16-051 | | |
| | | Paleozoico Superior | Grupo Mitu (Ps-Mi) | LP16-055 |
| | | | | Intrusivos |
| Complejo de San Gaban (Pt-Mzg/Gr) | Sienita Nefelinica (Jm-Si) | LP16-046 | | |
| | | LP16-054 | | |

5.1.1. Muestra: LP16-048

“Afloramiento en la zona de Ccoloyoc, donde se observa metamorfismo de mayor grado respecto a las pizarras, en esta zona se habría producido metamorfismo de contacto y regional, debido a que la roca presenta esquistosidad y blastos de cordierita y andalucita, en una matriz de cuarzo y abundantes micas. Este afloramiento se presenta concordante a la formación Ananea, además es parte de las colinas de elevadas pendientes que conforman la geomorfología. Presenta abundante cobertura vegetal típica de la zona de estudio, así como el ichu. Conformada por abundantes micas orientadas, además de cuarzo y algunos nódulos ligeramente orientados constituidos por agregado de minerales de color oscuro. Se observa una estructura de cuarzo ligeramente deformada, formando agregados lenticulares de cuarzo lechoso”.

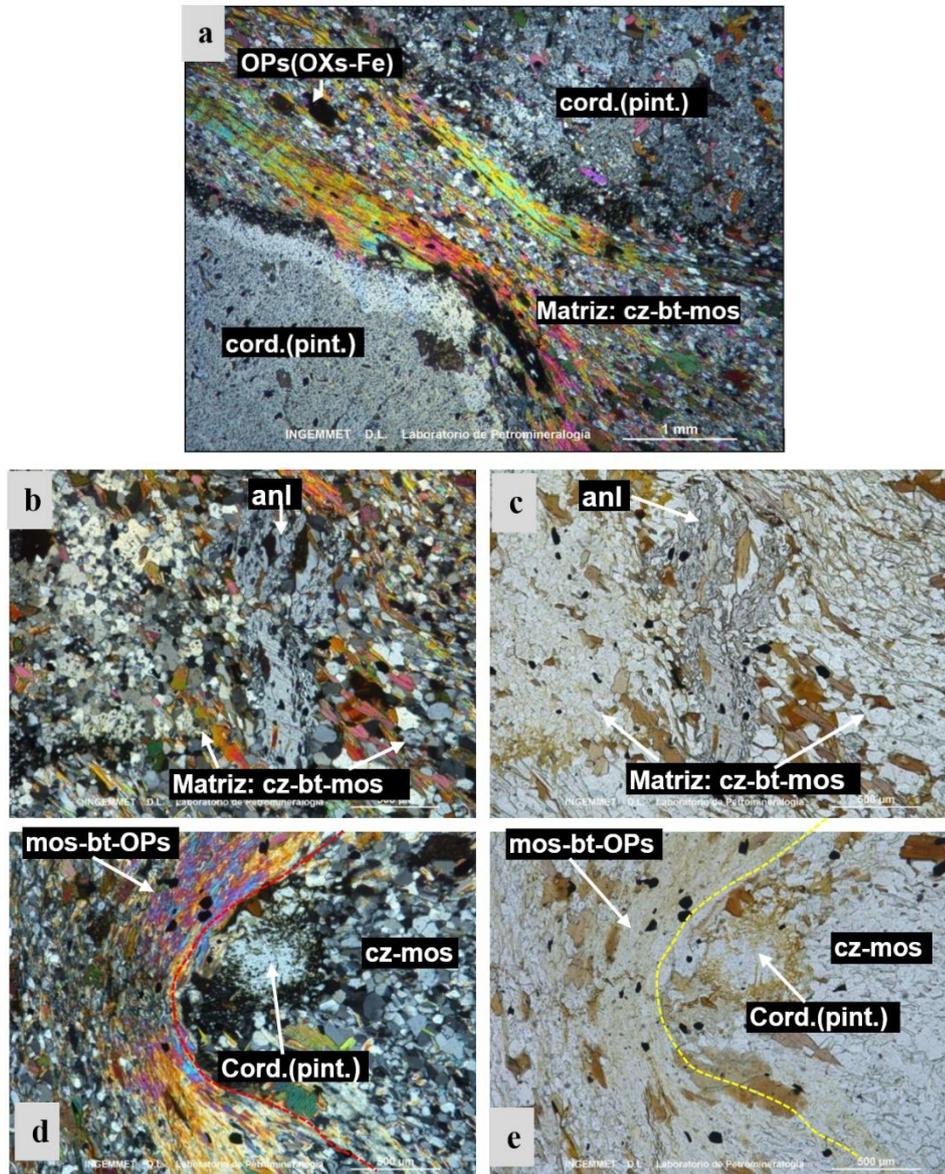
Figura 38

Afloramiento de Esquistos de la Formación Sandia, en el Cerro Ccoloyoc-Jupuna.



A. Estudio Petrográfico

Clasificación de la roca: ESQUISTO. **Texturas:** Porfidoblástica – epidogranoblástica



Fotomicrografía 01: **a.** Porfidoblastos de cordierita alterados a pinnita: cord. (pint.), de textura poiquiloblástica; en matriz lepidogranoblástica constituida por blastos de cuarzo, biotitas y moscovita: Matriz: cz-bt-mos; con diseminación de minerales opacos débilmente alterados a óxidos de hierro: OPs(OXs-Fe). **b. y c.** Porfidoblastos anhedrales de andalucita: anl. **d. y e.** Se observa un porfidoblasto de cordierita alterada a pinnita: cord. (pint.), mostrándose deformada como un pseudolente, con sombras de presión de agregados de cuarzo granulares junto a moscovita: cz-mos.

Tabla 6

Composición Mineralógica por Microscopía Óptica. Muestra LP16-048.

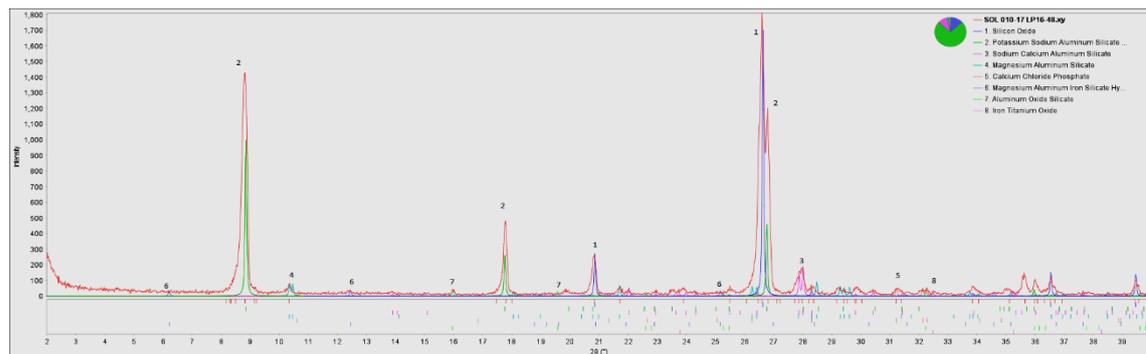
| Esenciales | % | Accesorios | % | Matriz | % | Secundarios | % |
|-------------------|----------|-------------------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|
| Cordierita | 12 | Minerales opacos | 10 | Cuarzo | 38 | Óxidos de hierro | 2 |
| | | Sillimanita | 5 | Biotita | 20 | Pinnita | 1 |
| | | Andalucita | 2 | Moscovita | 15 | | |
| | | Turmalina | 1 | | | | |
| | | Apatito | | | | | |

B. Estudio por Difracción de Rayos X

“Se realizó como un análisis complementario para obtener la composición mineralógica, además de corroborar la presencia de cordierita y andalucita, debido a que estos podrían estar conformando los nódulos o agregados minerales observados en muestra de mano”.

Figura 39

Difractograma de la Muestra LP16- 048



A continuación se presentan la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractograma obtenidos:

Tabla 7*Composición Mineralógica por DRX - Muestra LP16-48.*

| CODIGO DE MUESTRA: LP16-48 | | | |
|----------------------------|-------------|--|-------|
| Nº | MINERAL | FÓRMULA | % |
| 01 | Cuarzo | SiO ₂ | 49.16 |
| 02 | Muscovita | (K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 42.17 |
| 03 | Albita | (Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ | 4.55 |
| 04 | Cordierita | Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ | 1.50 |
| 05 | Clorapatita | Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl | 0.77 |
| 06 | Andalusita | Al ₂ (SiO ₄)O | 0.69 |
| 07 | Clorita | (Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 0.64 |
| 08 | Ilmenita | Fe ⁺² TiO ₃ | 0.51 |
| Total | | | 100 |

5.1.2. Muestra: LP16- 049

“Afloramiento de pizarra moteada en el sector de Asiento-Sonccoña de la formación Sandia, el cual se encuentra en contacto con la formación Ananea, ocurren adyacentemente debido a la falla inversa Paquellusi con orientación de NE a SW con azimut de 70° a 80°, además las rocas aflorantes de la formación Ananea se encuentra fuertemente deformados y fracturados. En esta zona se observa indicios y restos de trabajos de minería artesanal realizados en épocas pasadas, debido a que existe mineralización de cobre (sulfuros y óxidos de cobre). En la parte baja de esta zona se observa afloramiento del intrusivo de la sienita nefelinica, lo cual produjo metamorfismo de contacto en los estratos de pizarras, como resultado la roca presenta porfidoblastos de andalucita, en matriz fina de cuarzo, agregados finos de micas y arcillas. Se encuentra cortada por vetillas de cuarzo secundario (espesor ≤ 2mm).”

Figura 40

Afloramiento, Zona de Contacto Entre la Formación Ananea y Sandia, Puestos en Evidencia por la Falla Paquellusi.

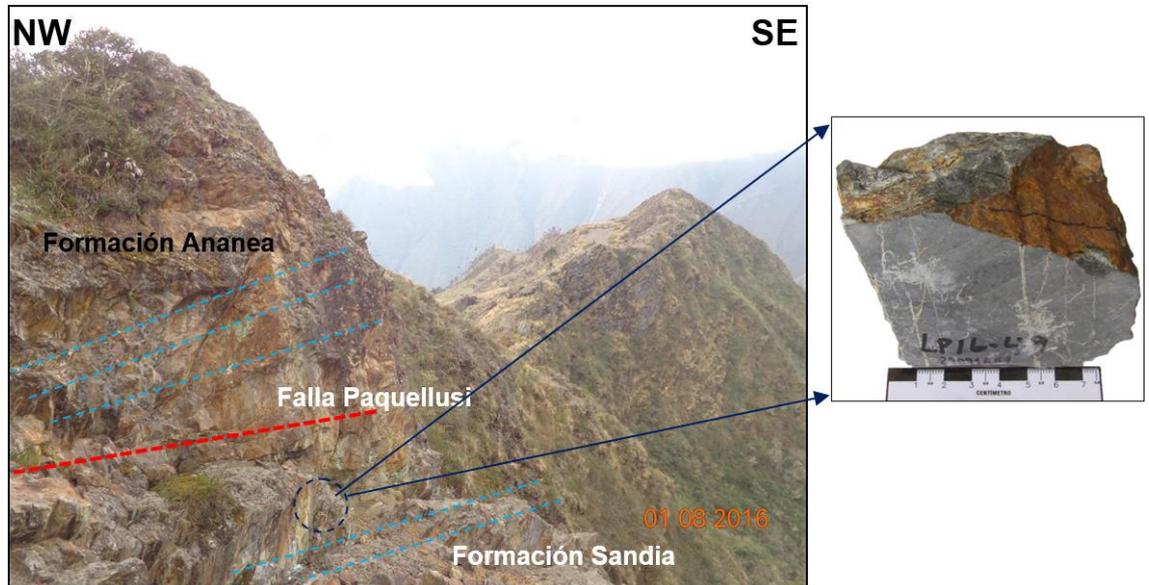
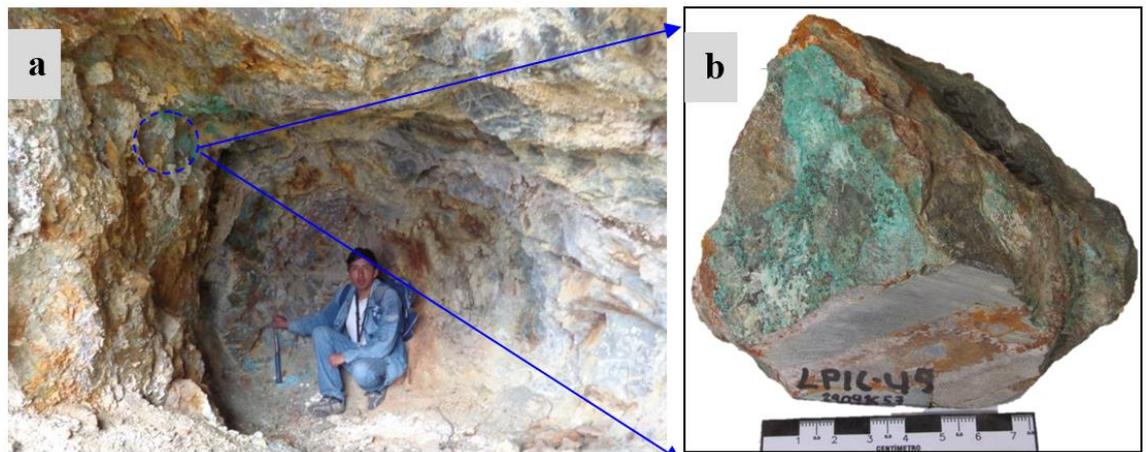


Figura 41

Ocurrencia de Mineralización de Cobre en la Formación Sandia.

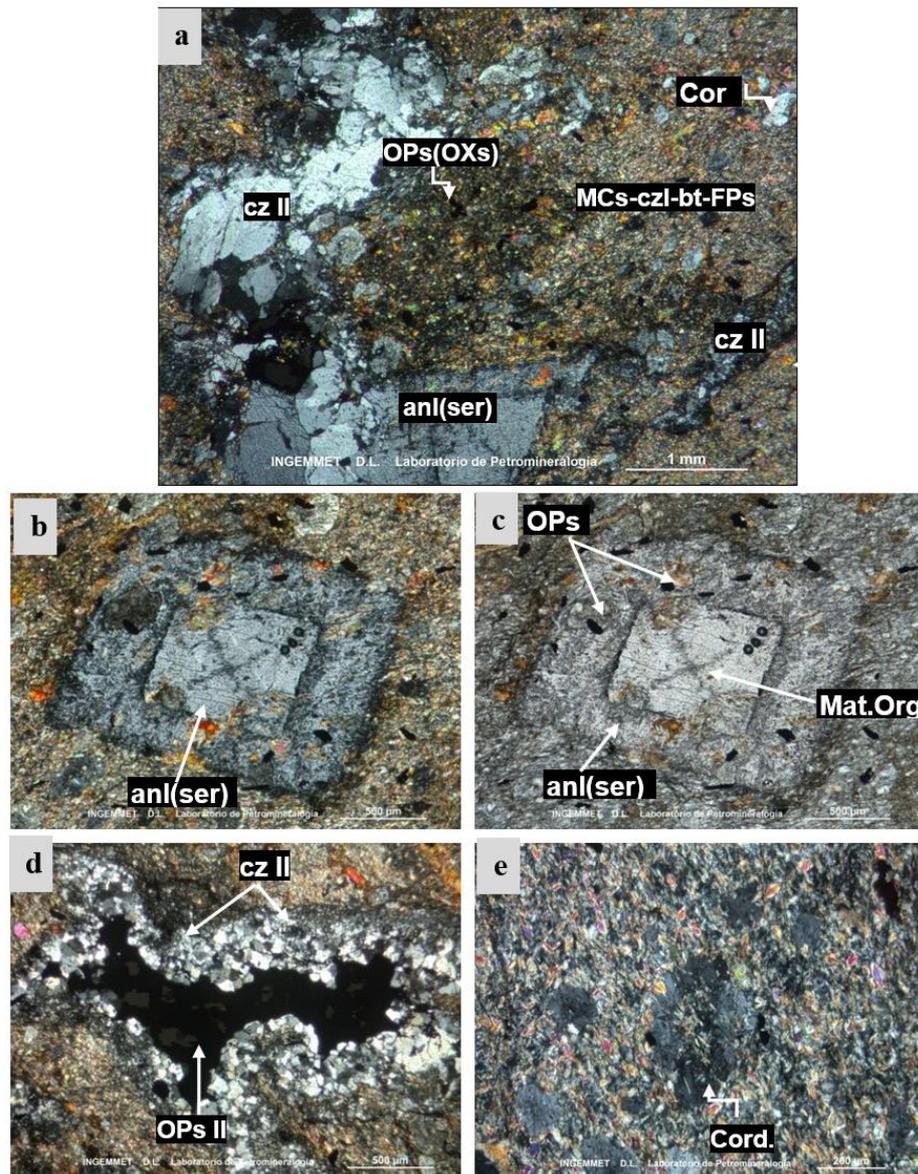


En a) se observa una labor artesanal abandonada, de donde se habría extraído mineralización de cobre. En b) se observa muestra de mano para el estudio minerográfico, con óxidos de cobre, además se presenta malaquita y óxidos de hierro.

A. Estudio petrográfico

Clasificación: PIZARRA MOTEADA. **Texturas:** Pórfido-lepidoblástica.

Tipo de metamorfismo: De contacto.



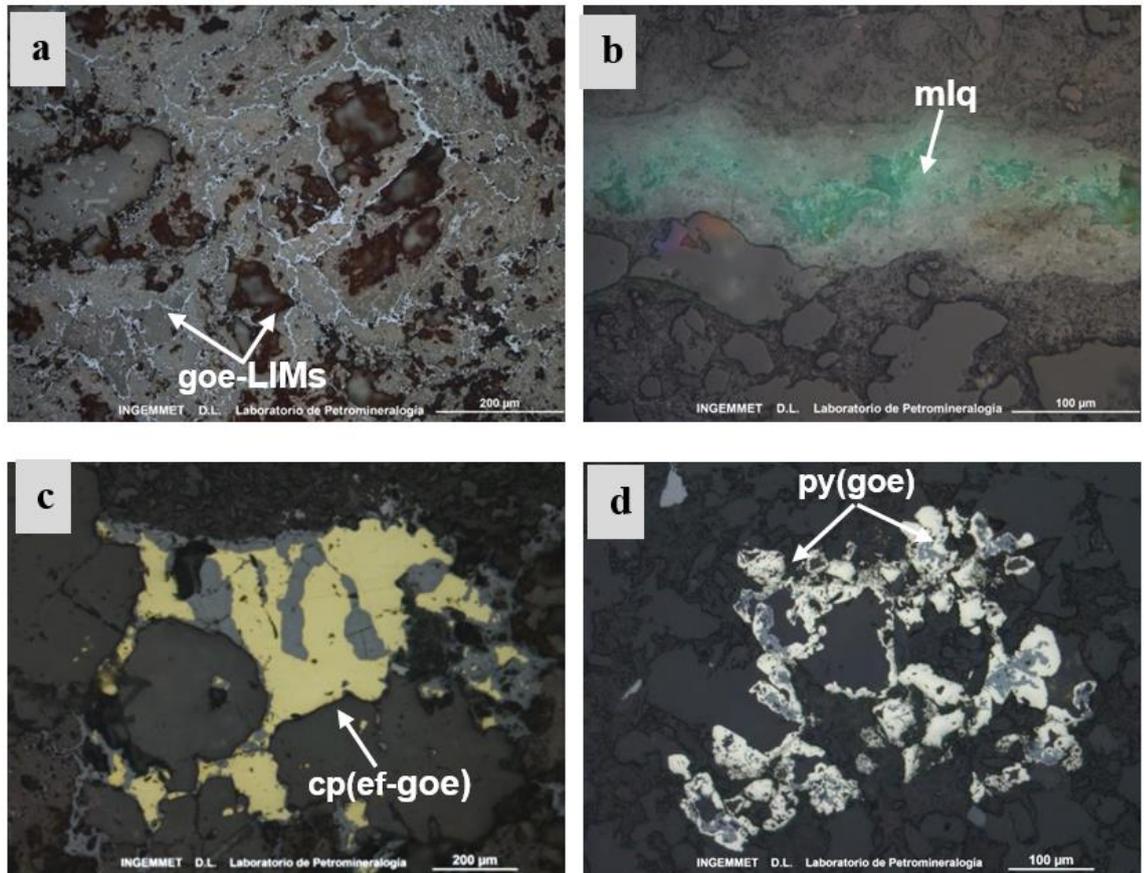
Fotomicrografía N° 02: a. Porfidoblastos de andalucita alterada a sericita: anl(ser), cordierita: cord, con diseminación de minerales opacos alterados a óxidos: OPs (OXs), cortada por venillas deformadas de cuarzo II:cz II; en matriz lepidoblástica de micas, cuarzo, biotitas y feldspatos: MCs-cz-bt-FPsK. b. y c. Porfidoblasto euhedral de andalucita alterada a sericita: anl(ser), con inclusiones de minerales opacos: OPs y materia organica en forma de cruz: Mat.Org. d. Venilla de cuarzo secundario: cz II, asociado con minerales opacos: OPs II. e. Porfidoblastos de cordierita mostrando macla circular o tipo “reloj de arena”: cord.

Tabla 8

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-49.

| Esenciales | % | Matriz | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|-------------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|
| Cordierita | 12 | Micas | 45 | | | Cuarzo II | 5 |
| Andalucita | 10 | Cuarzo | 8 | | | Óxidos | 1 |
| Minerales opacos | 5 | Biotita | 5 | | | Arcillas | 1 |
| Biotitas | 2 | Feldespatos | 2 | | | Sericita | 1 |
| Turmalina | 1 | | | | | Minerales opacos | 1 |
| | | | | | | Biotita II | 1 |
| | | | | | | Cloritas | 1 |

B. Estudio Minerográfico



Fotomicrografía N° 03: **a.** Agregados coliformes de goethita, junto con limonitas: goe-LIMs, dentro de fracturas. **b.** Agregados de malaquita en fracturas entre zonas de contacto entre roca caja y veta. **c.** Calcopirita reemplazada por esfalerita y alterados a goethita: cp (ef-goe), en fracturas. **d.** Agregados de pirita alterados por goethita:py(goe), dentro de roca caja.

Paragénesis:

Esfena-Pirita- Calcopirita- Esfalerita- Goethita- Malaquita- Limonita

Tabla 9

Composición Mineragráfica de la Muestra LP16-049.

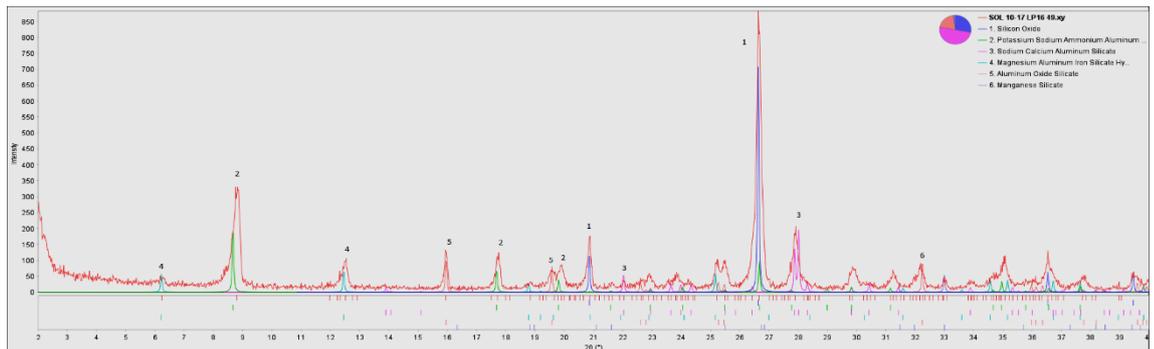
| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|------------|----|--------------------------------|---|--------|---|-------------|---|
| Gangas | 81 | Goethita | 7 | | | Limonita | 5 |
| | | Calcopirita | 4 | | | | |
| | | Esfalerita, Pirita y esfena | 3 | | | | |

C. Estudio por Difracción de Rayos x

La matriz es de grano muy fino por lo cual fue necesario recurrir a esta técnica para tener mayor precisión en la identificación mineralógica.

Figura 42

Difractograma de la Muestra LP16-049. Formación Sandia.



A continuación se presentan la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractograma obtenidos:



Tabla 10

Composición Mineralógica por DRX. Muestra LP16-49.

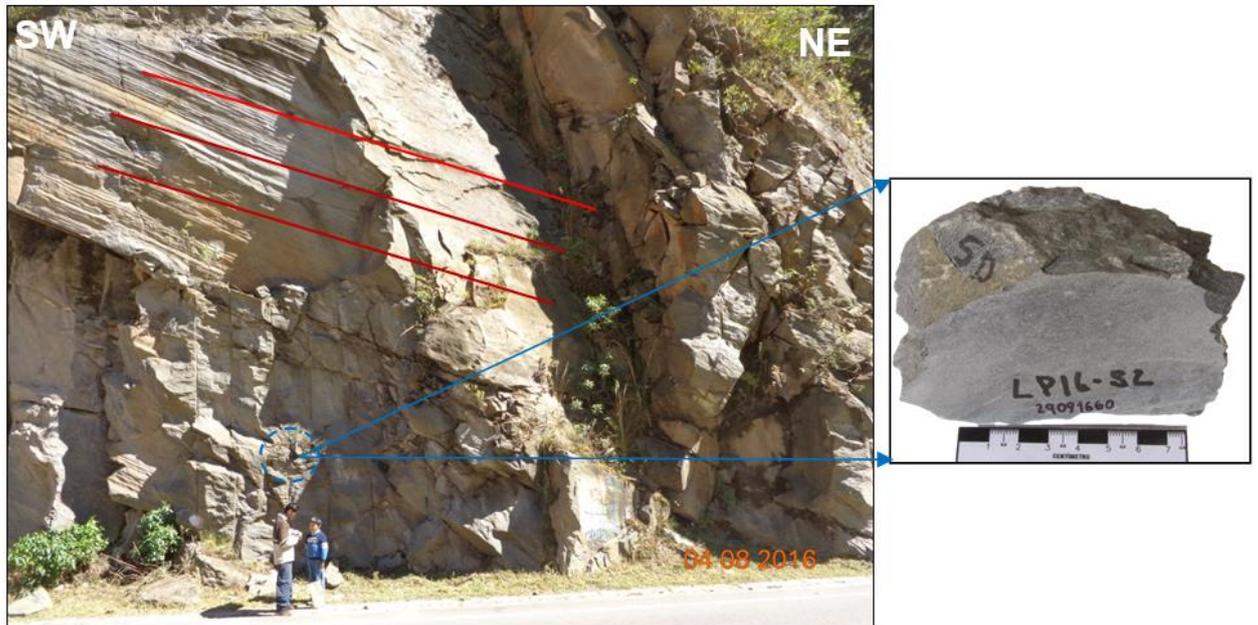
| Nº | MINERAL | FÓRMULA | % |
|-------|------------|---|-------|
| 01 | Cuarzo | SiO ₂ | 54.05 |
| 02 | Moscovita | (K,NH ₄ ,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 21.12 |
| 03 | Albita | (Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ | 11.44 |
| 04 | Andalusita | Al ₂ (SiO ₄)O | 6.42 |
| 05 | Clorita | (Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 5.12 |
| 06 | Braunita | Mn ⁺² Mn ⁺³ SiO ₁₂ | 1.86 |
| Total | | | 100 |

5.1.3. Muestra: LP16-52

“Se presentan afloramientos evidenciados por los cortes de la carretera interoceánica, a pesar de estar cubiertos extensamente por vegetación; se extiende a partir de la zona de Cuncurchaca, Muyucpampa y hacia las faldas del cerro Wincuña, donde presentan orientación de NE a SW, se encuentra foliados y fracturados, presentando diaclasamientos. Litológicamente está conformado por esquistos, presentando abundantes micas y cuarzo. Hacia el NE y SE, en el margen derecho del río Ollachea estos afloramientos forman las colinas con pendientes muy elevadas.”

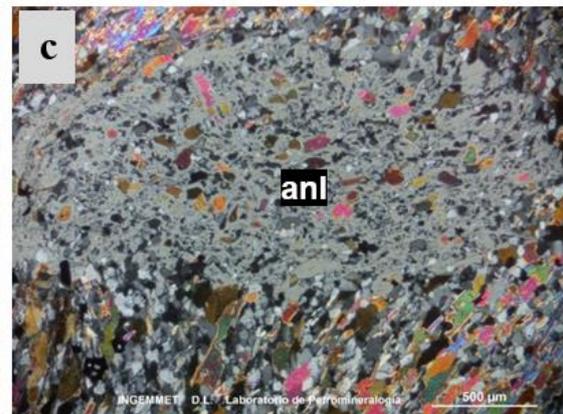
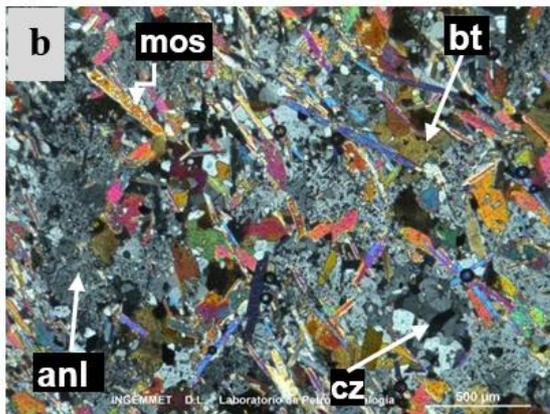
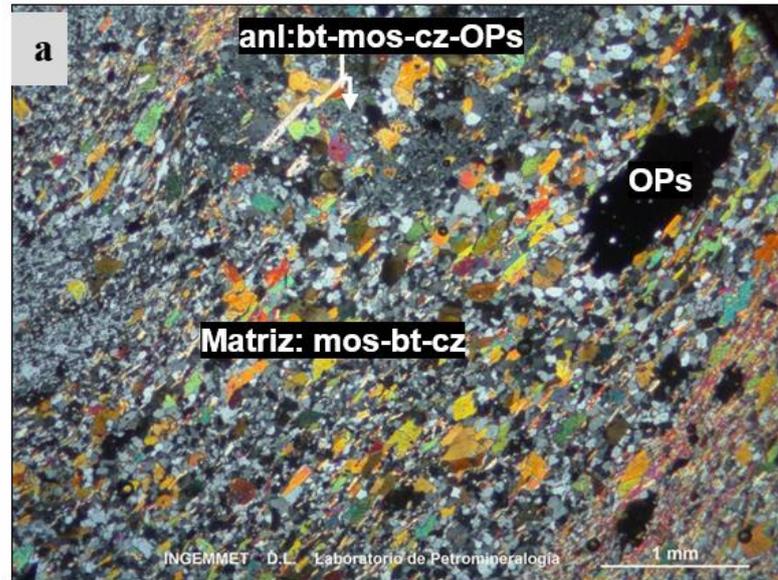
Figura 43

Afloramiento de Esquistos Micáceos de la Formación Sandia, en la Zona de Muyucpampa. Muestra de Mano (LP16-052).



A. Estudio petrográfico

Clasificación: ESQUISTO MICACEO. **Texturas:** Pórfido-lepidoblástica. **Tipo de metamorfismo:** Regional.



Fotomicrografías N° 04: a. “Porfidoblastos de andalucita de textura poiquiloblástica con inclusiones de biotita, moscovita, cuarzo y minerales opacos: anl: bt-mos-cz-OPs; en matriz de textura grano-lepidoblástica de cuarzo, biotitas y moscovitas: Matriz:cz-bt-mos. Con minerales opacos: OPs. b. Agregado de blastos de cuarzo: cz, biotita:bt, andalucita: anl y moscovita: mos. c. Porfidoblasto de andalucita con textura poiquiloblástica: anl”

Tabla 11

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-52.

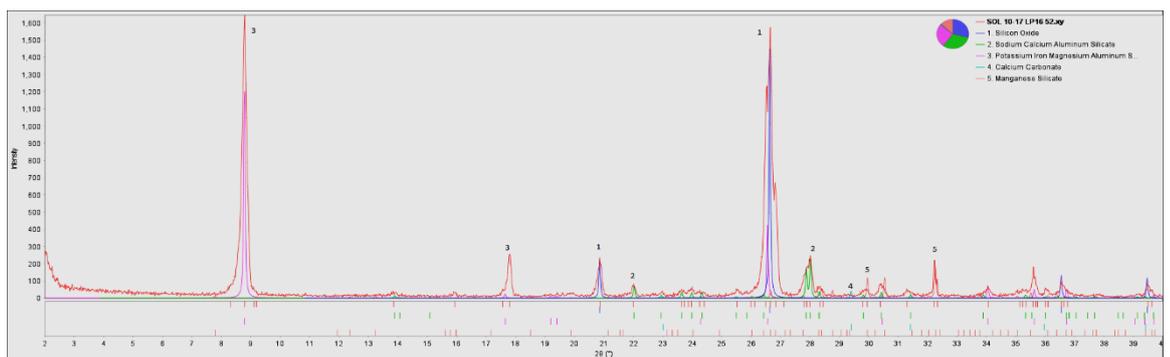
| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Matriz | % |
|------------|--------|------------------|---|------------------|---|------------------|----|
| Andalucita | 1 3 | Minerales opacos | 2 | Arcillas | - | Cuarzo | 35 |
| | | Turmalina | 2 | Óxidos de hierro | - | Biotita | 25 |
| | | Apatito | 1 | | | Moscovita | 15 |
| | | | | | | Sillimanita | 2 |
| | | | | | | Minerales opacos | 5 |

A. Estudio por Difracción de Rayos X

“En la figura N° 48 se observa el difractograma obtenido, en la cual resalta los picos del cuarzo, así mismo en la tabla 6 se presentan los minerales identificados mediante el estudio por difracción de rayos X.”

Figura 44

Difractograma de la Muestra LP16-052. Formación Sandia.



A continuación se presentan la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractogramas obtenidos:

Tabla 12

Composición Mineralógica por DRX. Muestra LP16-52.

| N° | MINERAL | FÓRMULA | % |
|-------|----------|--|-------|
| 01 | Cuarzo | SiO ₂ | 44.88 |
| 02 | Biotita | K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂ | 42.99 |
| 03 | Rodonita | MnSiO ₃ | 6.42 |
| 04 | Albita | (Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ | 5.54 |
| 05 | Calcita | CaCO ₃ | 0.17 |
| Total | | | 100 |

5.1.4. Muestra: LP16-53

“La formación Sandia continua en extensión al NE del distrito de Ollachea hacia la parte baja del sector de Challouno, cerca al río Oscocachi, observándose afloramientos perfectamente visibles en algunas zonas de la carretera

interoceánica, en el margen izquierdo del río Ollachea, donde la litología corresponde a esquistos con presencia de micas y cuarzo, muy semejante a la zona de Muyucpampa; además en esta zona la formación Sandia se encuentra cortado por diversas vetas de cuarzo con espesores aproximados de 20cm. Además, se encuentra en contacto con material coluvial, presentando cantos rodados con tamaños de hasta 50cm. En el margen derecho del río Ollachea, continua los afloramientos de la formación Sandia, formando colinas de elevada pendiente, que constituyen el cerro QosccoOrco.”

Figura 45

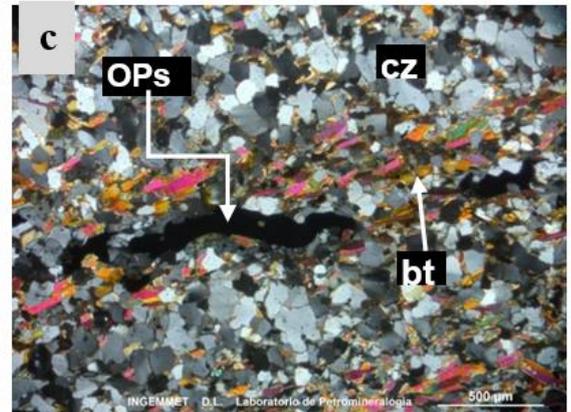
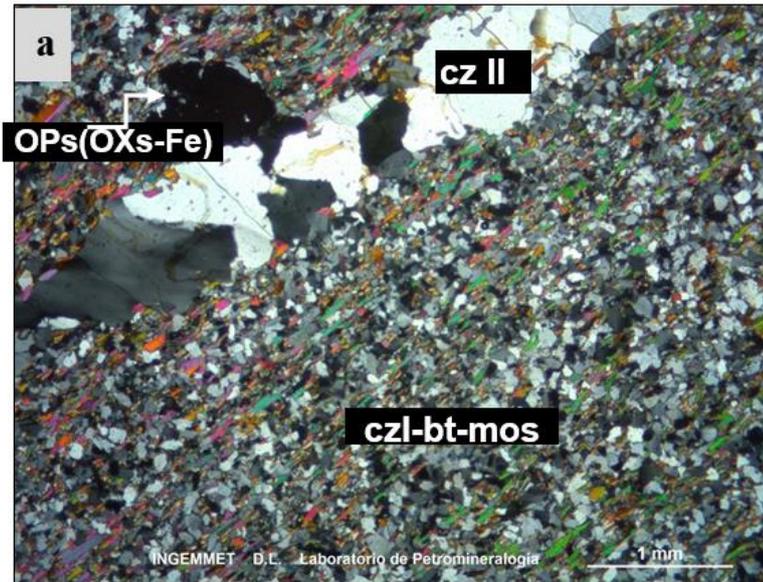
Afloramiento de la Formación Sandia en la Zona de Challouno, Presenta Cobertura Coluvial. Muestra de Mano LP16-53.



A. Estudio Petrográfico

Clasificación: ESQUISTO MICACEO. **Texturas:** Grano-lepidoblástica.

Tipo de metamorfismo: Regional



Fotomicrografías N° 05: **a.** Blastos de cuarzo I: cz I, alternados con biotita:bt y moscovita: mos, cortados por una venilla de cuarzo II: cz II; con mineral opaco alterado a óxidos de hierro: OPs(OXs-Fe). **b.** Blasto subhedral de granate: gr, junto a cuarzo I:cz I y biotita:bt. **c.** Ligerá segregación de blastos de biotita:bt y moscovita: mos, alternados con blastos de cuarzo I:cz I, con minerales opacos: OPs.

Tabla 13

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-53.

| Esenciales | % | Accesorios | % | Secundarios | % |
|------------|----|---------------------|---|------------------|---|
| Cuarzo | 40 | Minerales opacos | 5 | Cuarzo II | 2 |
| Biotita | 34 | Apatito/sillimanita | 5 | Óxidos de hierro | 1 |
| Moscovita | 5 | Granates | 3 | cloritas | 1 |
| | | Turmalina | 2 | Minerales opacos | 1 |
| | | Zircón | 1 | | |

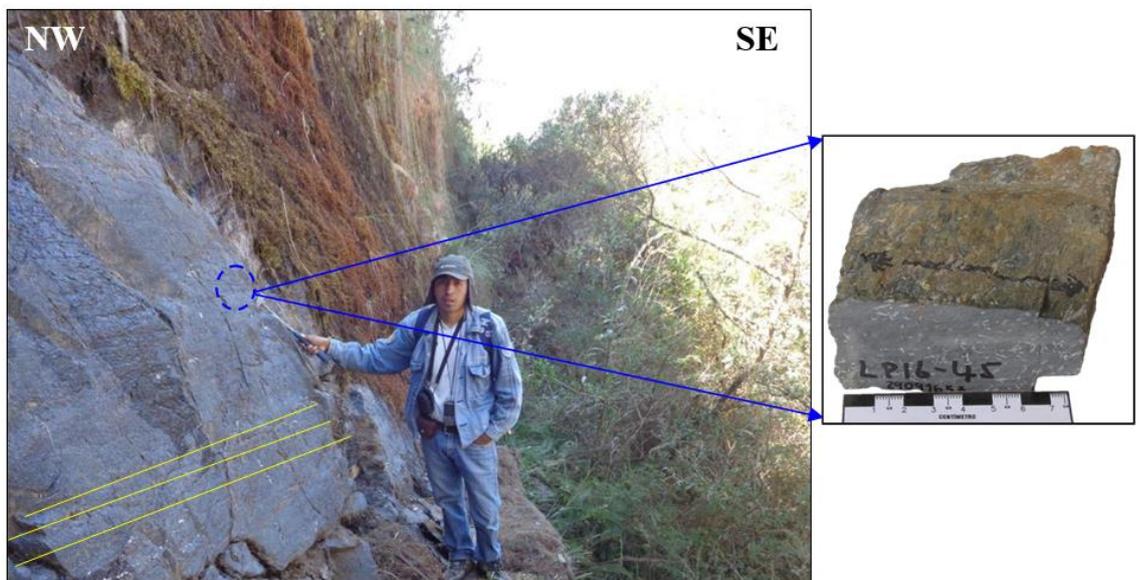
5.1.5. Muestra: LP16-45

Afloramiento de pizarra en la zona de Jupuna al SW de Ollachea, se aprecia fácilmente la foliación de la roca, está constituido de porfidoblastos de

andalucita alterados con tamaños de 2mm, en una matriz fina de color gris oscuro con tonalidad azulina, se encuentran metamorfizada mostrando foliación. Superficialmente está cubierto por material orgánico, además sobre esta se desarrollan abundante presencia de vegetación. Además, se observa algunas vetillas subparalelas a la foliación de la roca.

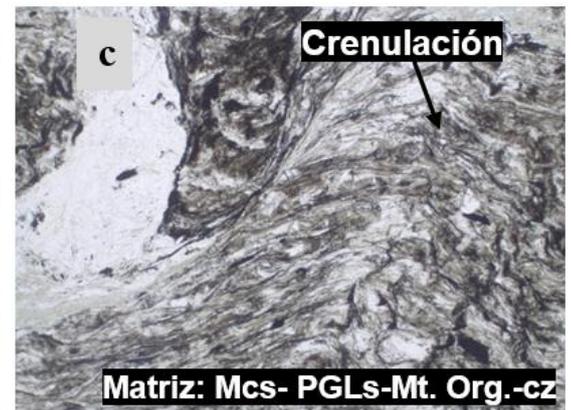
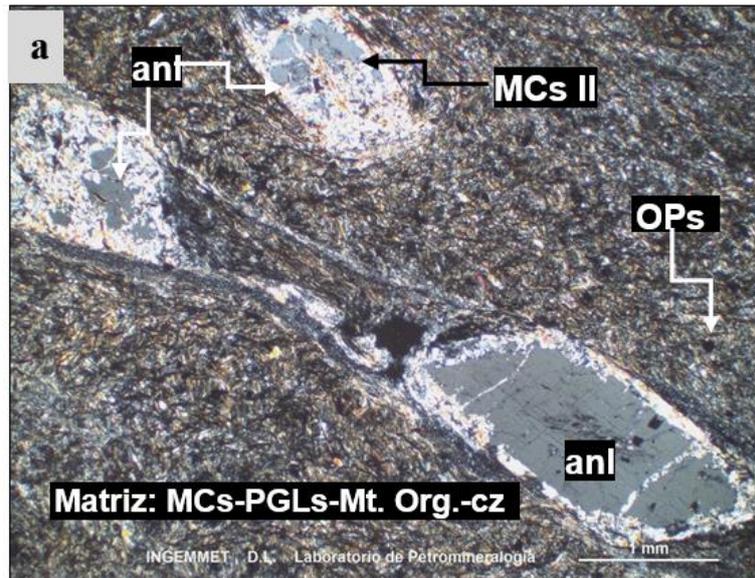
Figura 46

Afloramiento de Pizarras en la Formación Ananea, en la Zona de Jupuna-Chullu. Muestra de Mano LP16-45.



A. Estudio Petrográfico

Clasificación: Pizarra. Texturas: Porfidoblástica. Tipo de metamorfismo:
Regional.



Fotomicrografías N° 06: a. “Porfidoblastos de andalucita alterados a micas II: anl (MCs II), con sombras de presión; distribuidos en matriz de micas I, plagioclasas, material orgánico terroso y escaso cuarzo: Matriz: MCs-PGLs-Mt.Org.-cz; con diseminación de minerales opacos: OPs. b. y c. Se observa estructuras de crenulación en la matriz, constituida por micas, plagioclasas, materia orgánica y cuarzo: Matriz: MCs-PGLs-Mat. Org.-cz”.

Tabla 14

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-45.

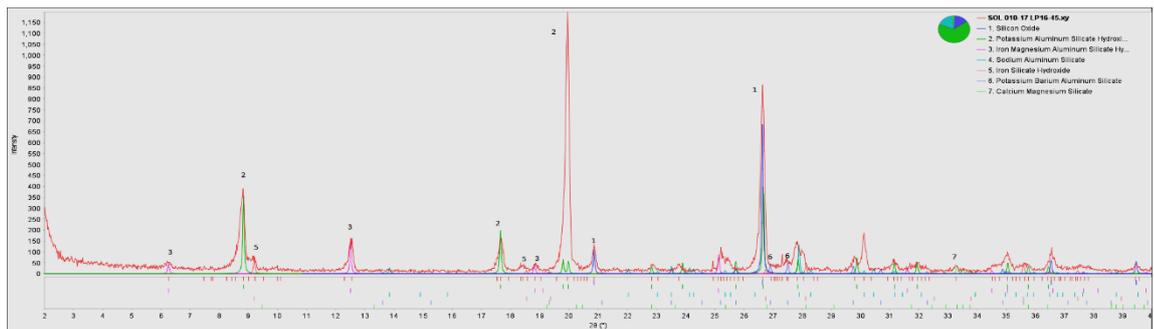
| Esenciales | % | Accesorios | % | Matriz | % | Secundarios | % |
|------------|----|------------------|---|------------------|----|-------------------|---|
| Andalucita | 15 | Minerales opacos | 5 | Micas | 58 | Sericita | 3 |
| | | Turmalina | 1 | Plagioclasas | 6 | Micas secundarias | 2 |
| | | | | Materia orgánica | 5 | Cloritas | 1 |
| | | | | cuarzo | 1 | Arcillas y oxidos | 2 |

B. Estudio por Difracción de Rayos X

“Resultado de la composición mineralógica determinados por difracción de rayos X (ver tabla 9), además se observa el difractograma en la figura 47 donde resaltan los picos del cuarzo.”

Figura 47

Difractograma de la Muestra LP16-45. Formación Ananea.



A continuación la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractogramas:

Tabla 15

Composición Mineralógica por DRX. Muestra LP16-45.

| CODIGO DE MUESTRA: LP16-45 | | | |
|----------------------------|--------------|---|-------|
| Nº | MINERAL | FÓRMULA | % |
| 01 | Cuarzo | SiO ₂ | 52.54 |
| 02 | Illita | (K,H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ | 20.49 |
| 03 | Albita | NaAlSi ₃ O ₈ | 12.00 |
| 04 | Clorita | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 7.79 |
| 05 | Minnesotaite | (Fe ⁺² ,Mg) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 3.06 |
| 06 | Ortoclasa | (K,Ba,Na)(Si,Al) ₄ O ₈ | 2.45 |
| 07 | Nerwinita | Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ | 1.66 |
| Total | | | 100 |

Según la tabla N° 9, existe abundante presencia de cuarzo, sin embargo, ello es contradictorio con el estudio petrográfico pues en esta el cuarzo aparece solo en 1%, ello se debe a que en el análisis por rayos X, el cuarzo presenta elevada



reflectancia con lo que sus porcentajes siempre será muy por encima de lo normal, por más mínima presencia de cuarzo en la muestra; pues ópticamente en la matriz de la muestra no se evidencia cuarzo más del 1%.

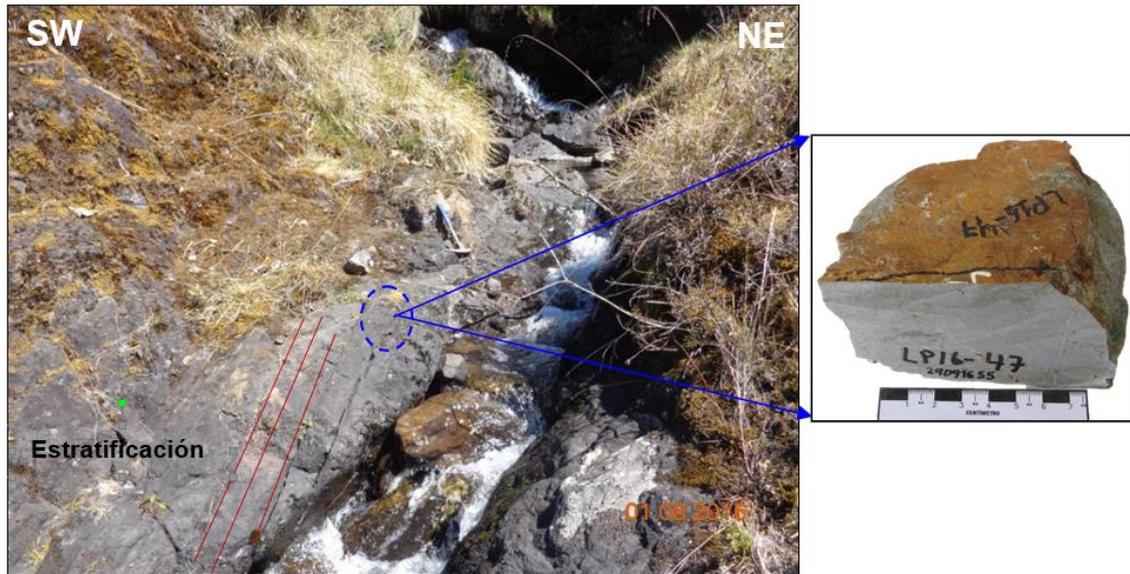
Así mismo se destaca la presencia de arcillas (Illita) en una elevada proporción, lo cual es consistente con el estudio petrográfico, debido a que la matriz de la muestra se encuentra recrystalizada a micas a partir de arcillas preexistentes.

5.1.6. **Muestra: LP16-47**

La formación Sandía se extiende de E a W, se observa diversos afloramientos, con estratos de pizarras y areniscas, así como en la zona de Ccolpapampa-Jupuna, en contacto concordante y adyacente con anticlinales y sinclinales de la formación Ananea. Se observa escasas vetillas con espesores de 2 mm que cortan la roca, conformados por cuarzo, pirita y calcopirita, además presentan fracturas rellenas por óxidos de hierro. Se observa abundante cobertura de vegetación típica del área de estudio.

Figura 48

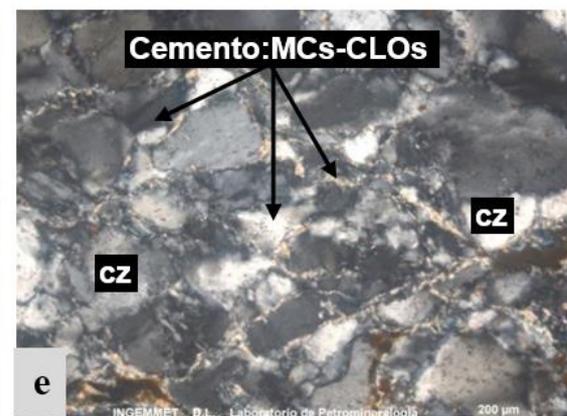
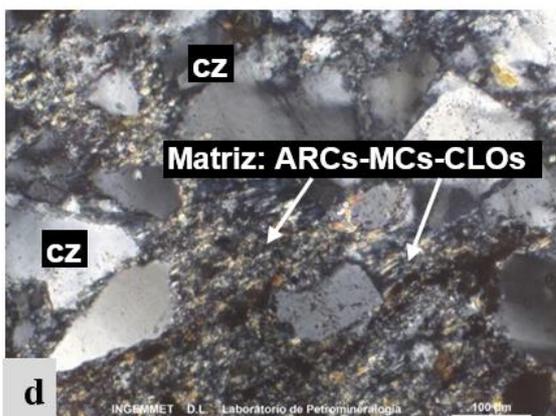
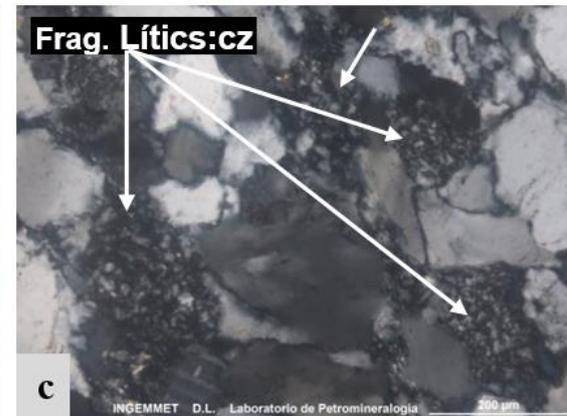
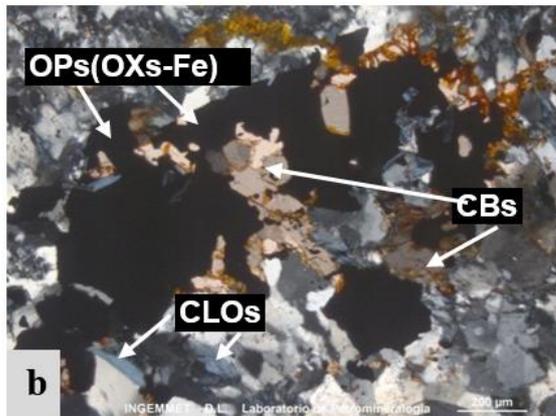
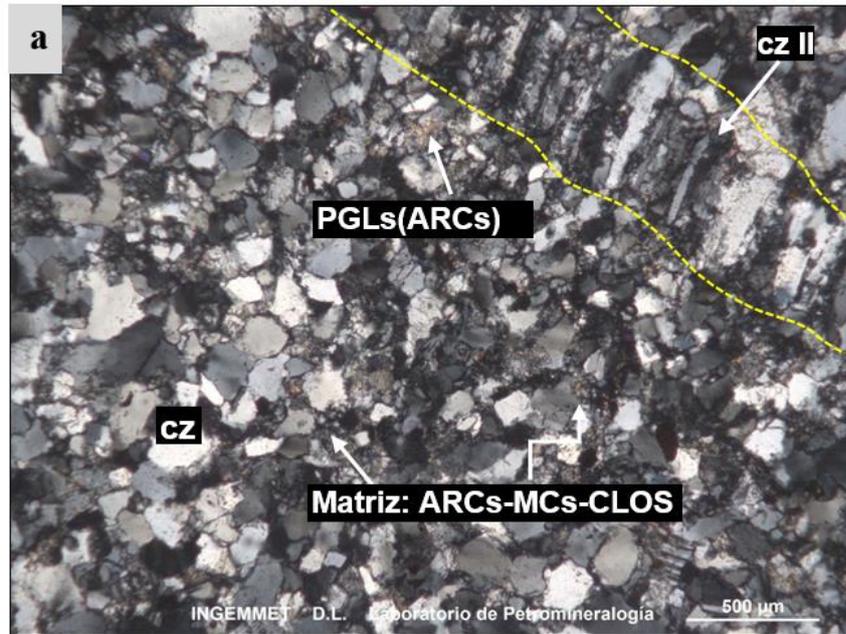
Afloramiento de areniscas de grano fino de la formación Ananea, en la zona de Ccollpapampa-Jupuna. Muestra de mano LP16-47.



A. Estudio Petrográfico

Clasificación: ARENISCA SUBARCOSA. **Texturas:** Clástica.

Roca sedimentaria con textura grano soportado, constituida principalmente por granos de cuarzo y en menores cantidades feldespatos potásicos, plagioclasas y fragmentos líticos; con accesorios de minerales opacos, rutilo, turmalina y zircón; con escasa matriz de micas y arcillas; presenta cemento de cloritas y micas; además se observa venillas rellenas por cuarzo secundario asociado a minerales opacos y carbonatos. La muestra posee débil alteración dado por cloritas, arcillas, sericita, óxidos y carbonatos.



Fotomicrografías N° 07: **a.** “Granos subangulosos de cuarzo: cz; plagioclasas alteradas a arcillas: PGLs(ARCs); en escasa matriz de arcillas, micas y cloritas: Matriz: ARCs-MCs-CLOs; además de una venilla conformada por cuarzo secundario: cz II. **b.** Minerales opacos alterados a óxidos de hierro: OPs(OXs-Fe), asociados a carbonatos secundarios:CBs y cloritas: CLOs, impregnados por óxidos de hierro:OXs-Fe. **c.** Fragmentos líticos de naturaleza metamórfica, constituida por microcristales de cuarzo: Frag. Líticos: cz. **d.** Detalle de la matriz con arcillas, micas y cloritas: Matriz: ARCs-MCs-CLOs, que engloban a cuarzo: cz. **e.** Granos de cuarzo: cz, cementados por agregados de micas y cloritas: MCs-CLOs”.

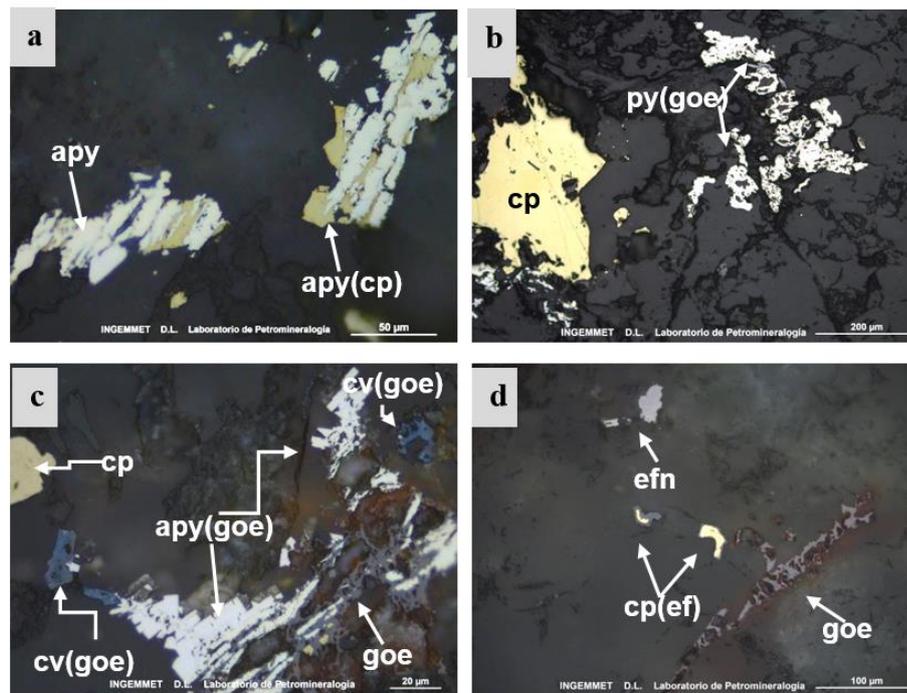
Tabla 16

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-47.

| Esenciales | % | Accesorios | % | Matriz | % | cemento | % | Secundarios | % |
|-----------------------|----|------------------|---|----------|---|----------|---|-------------|---|
| Cuarzo | 46 | Minerales opacos | 2 | Arcillas | 8 | Cloritas | 3 | cloritas | 3 |
| Plagioclasas | 8 | Rutilo | 1 | Micas | 5 | Micas | 4 | Micas | 4 |
| Feldespatos potásicos | 5 | Turmalina | 1 | | | | | cloritas | 2 |
| Fragmentos líticos | 2 | Zircón | 1 | | | | | arcillas | 2 |
| Moscovitas | 1 | | | | | | | Cuarzo II | 3 |
| | | | | | | | | Sericita | 2 |
| | | | | | | | | Carbonatos | 1 |

B. Estudio Minerográfico

La roca presenta fracturas muchas de ellas rellenas por calcopirita y pirita, por sectores asociados a arsenopirita, ocasionalmente se observa presencia de covelita. La muestra está alterada por goethita, limonitas y covelita.



Fotomicrografías N° 08: **a.** Arsenopirita reemplazado por calcopirita: apy(cp), dentro de microfracturas en gangas. **b.** Agregado de cristales de pirita reemplazados por goethita:py(goe), junto a cristales de calcopirita: cp. **c.** Arsenopirita alterada por goethita: apy(goe), junto a covelita alterada por goethita:cv(goe), además de calcopirita: cp. **d.** Calcopirita reemplazada por esfalerita, además de agregados de goethita dentro de fracturas.



Tabla 17

Composición Mineragráfica de la Muestra LP16-047.

| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|-------------------|----------|-------------------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|
| Ganga | 86 | Esfena | 1 | esfalerita | | rutilo | 1 |
| | | arsenopirita | 1 | covelita | | Limonita | 2 |
| | | calcopirita | 4 | | | | |
| | | pirita | 1 | | | | |
| | | goethita | 3 | | | | |

Paragénesis

Esfena-Arsenopirita-Calcopirita-Esfalerita-Covelita-Goethita-

Limonita

5.1.7. Muestra: LP16-50

Aflora en la zona de Cuncurayoc, donde alrededores se presentan abundantes labores mineras artesanales, litológicamente consta de pizarras con orientación de SW a NE, estas se encuentran fracturadas y deformadas por sectores formando plegamientos a modo de anticlinales y sinclinales en la zona de Minapampa y Oscocahi. Esta zona tiene importancia económica por presentar ocurrencia de oro en vetas de cuarzo, asociados a sulfuros de hierro.

Figura 49

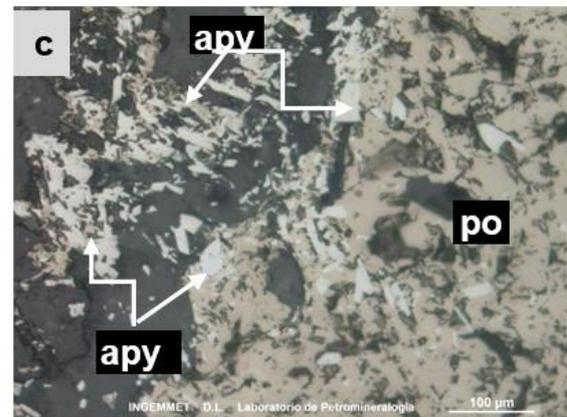
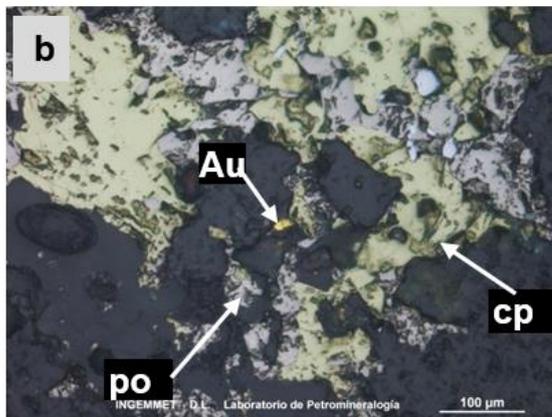
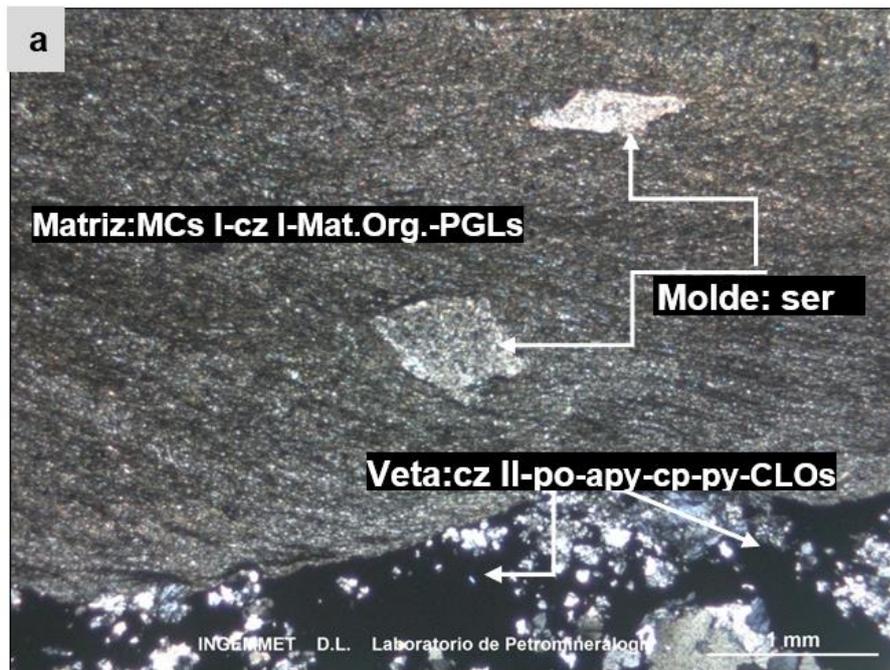
Punto de Muestreo de la Formación Ananea en la Zona de Cuncurayoc, en el Margen Derecho del Rio Oscocachi. Muestra de Mano LP16-50.



A. Estudio Petromineralógico

Clasificación: PIZARRA. Texturas: Lepidoblástica. Tipo de metamorfismo: Regional.

Roca de naturaleza metamórfica con textura lepidoblástica. Constituida por agregados micáceos y escaso cuarzo, con diseminación de cristales de pirrotita asociado puntualmente a oro nativo, se encuentran orientados y alargados, también se presenta materia orgánica; además se observa moldes de porfidoblastos reemplazados por sericita. La muestra está cortada por una veta de cuarzo secundario asociado con pirrotita, calcopirita y agregados de cloritas.



Fotomicrografías N° 09: **a.** Moldes de porfiroblastos reemplazados por sericita: Molde: ser; en matriz lepidoblástica conformada por agregados micáceos I, escaso cuarzo I, material orgánico y plagioclasas: Matriz: MCs I-cz I-Mat.Org.-PGLs; veta de cuarzo asociada a pirrotita, arsenopirita, calcopirita, pirita y cloritas: Veta: cz II-Po-Ars-Cpy-Py-CLOs. **b.** Pirrotita: po, reemplazado por calcopirita: cp, además de oro libre: Au. **c.** Cristales de arsenopirita: apy, reemplazados por agregado de cristales de pirrotita:po. **d. y e.** Cristales orientados y alargados de oro: Au, ocurren dentro de la roca caja.

Tabla 18*Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-50.*

| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|--------------------|----------|----------------------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|
| Micas I(moscovita) | 58 | Materia orgánica | 8 | oro | - | Cuarzo II | 8 |
| Cuarzo I | 3 | Pirrotita | 5 | | | Cuarzo III | 8 |
| | | Plagioclasas | 2 | | | Arcillas | 3 |
| | | Molde de blastos | - | | | sericita | 3 |
| | | Arsenopirita | 3 | | | Cloritas | 2 |
| | | Calcopirita y pirita | 3 | | | Micas II | 1 |
| | | | | | | Óxidos de hierro | 1 |

Paragénesis:

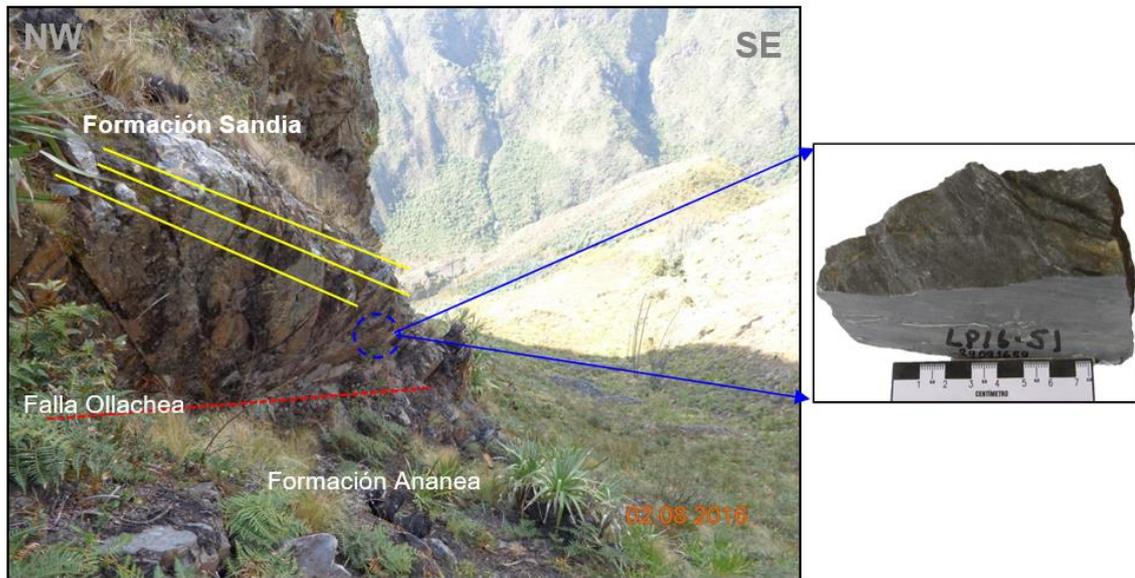
Pirrotita- Pirita- Calcopirita- Esfalerita-Goethita.

5.1.8. Muestra: LP16-51

Aflora en la parta alta de Challouno, en cercanías al Cerro Lanlacu, con litología de areniscas de grano fino mostrando estratificación, alterados con pizarras grises azulinas deformadas y fracturadas, se extiende por toda la zona de Challouno, Lanlacu y el cerro de Joropiña, esta formación mantiene su orientación de E a O, subparalelo a la falla inversa Ollachea, con rumbo de NE a SW, con azimut de 65° a 75°, buzando hacia NE, además esta falla pone en superposición a la formación Sandia sobre las pizarras de la formación Ananea.

Figura 50*Afloramiento del Contacto Entre la Formación Sandia y Ananea, Expuesto por la Falla*

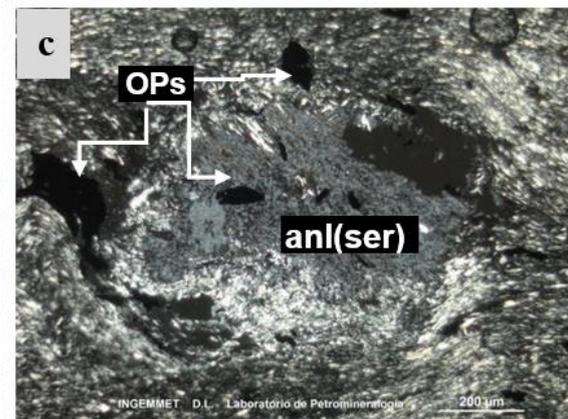
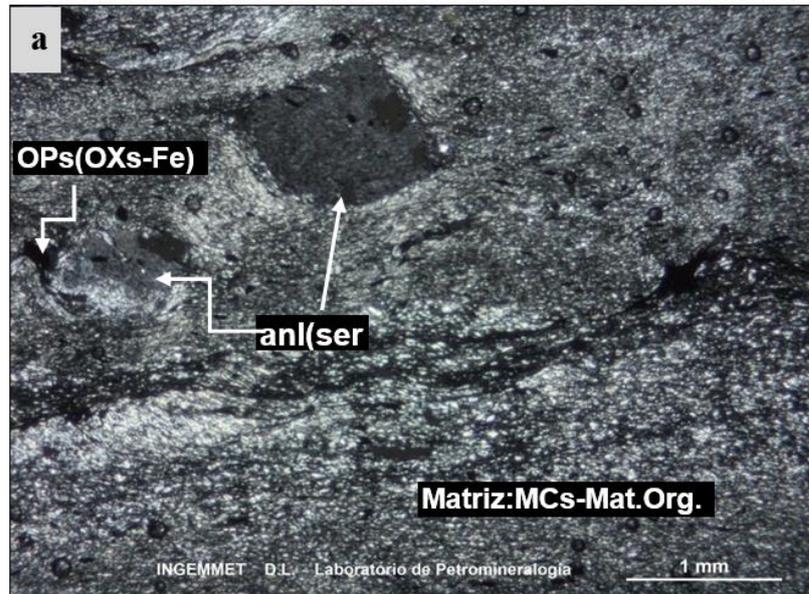
Ollachea, en la Parte Alta del Sector Challouno, Cercano al Cerro Lanlacu. Muestra de Mano LP16-51.



A. Estudio Petrográfico

Clasificación: PIZARRA. Texturas: Lepidoblástica. Tipo de metamorfismo: Regional.

La roca esta conformada por agregados micaceos orientados, con diseminación de minerales opacos; así mismo se presentan delgadas estructuras (hileras) conformadas por materia orgánica formando bandas sinuosas subparalelas, también se presentan escasos porfiroblastos orientados de andalucita. La muestra presenta débil alteración por arcillas y óxidos.



Fotomicrografías N° 10: **a.** Porfiroblastos de andalucita alterados a sericita:anl(ser) dispuestos en forma de “ojo”; en matriz lepidoblástica conformada por micas y materia orgánica dispuestos en forma de hileras, formando crenulación. **b.** Fractura rellena por minerales opacos alterados a óxidos de hierro: OPs (OXs-Fe). **c.** Blasto de andalucita alterado a sericita, ligeramente deformado según la dirección de crenulación, asociado a minerales opacos deformados: OPs.

Tabla 19

Composición Mineralógica por Microscopía Óptica. Muestra LP16-51.

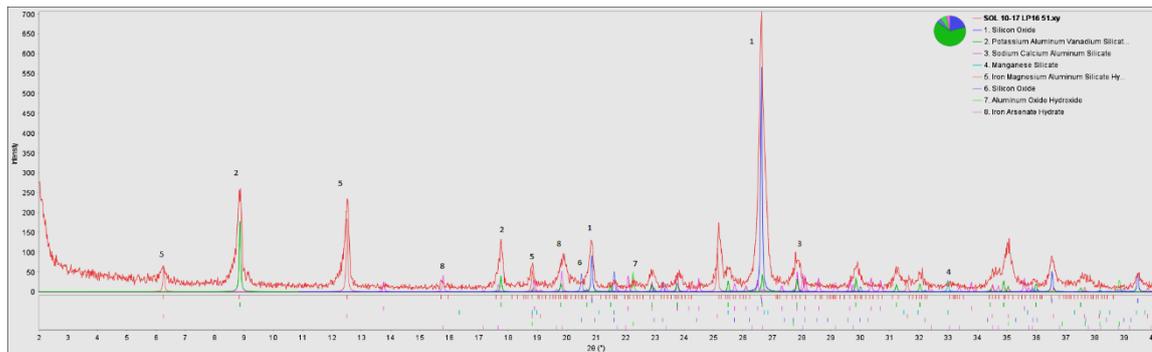
| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|------------|----|------------------|---|--------|---|------------------|---|
| Micas | 84 | Minerales opacos | 5 | | | Arcillas | 2 |
| | | Materia orgánica | 3 | | | Óxidos de hierro | 1 |
| | | Andalucita | 3 | | | sericita | 1 |
| | | Turmalina | 1 | | | | |

B. Estudio por Difracción de Rayos X

Resultado del análisis mineralógico por difracción de rayos X con difractograma y lista de minerales identificados cualitativa y cuantitativamente.

Figura 51

Difractograma de la Muestra LP16-51. Formación Sandia-Zona de Lanlacu.



A continuación se presentan la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractogramas obtenidos:

Tabla 20

Composición Mineralógica por DRX. Muestra LP16-51.

| CODIGO DE MUESTRA: LP16-51 | | | |
|----------------------------|-----------|---|-------|
| N° | MINERAL | FÓRMULA | % |
| 01 | Cuarzo | SiO ₂ | 52.49 |
| 02 | Clorita | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 20.49 |
| 03 | Muscovita | K(Al,V) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 16.94 |
| 04 | Albita | (Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈ | 6.53 |
| 05 | Diáspora | AlO.OH | 1.22 |
| 06 | Tridimita | SiO ₂ | 1.11 |
| 07 | Braunita | Mn ⁺² Mn ⁺³ SiO ₁₂ | 0.66 |
| 08 | Scordita | FeAsO ₄ .2H ₂ O | 0.55 |

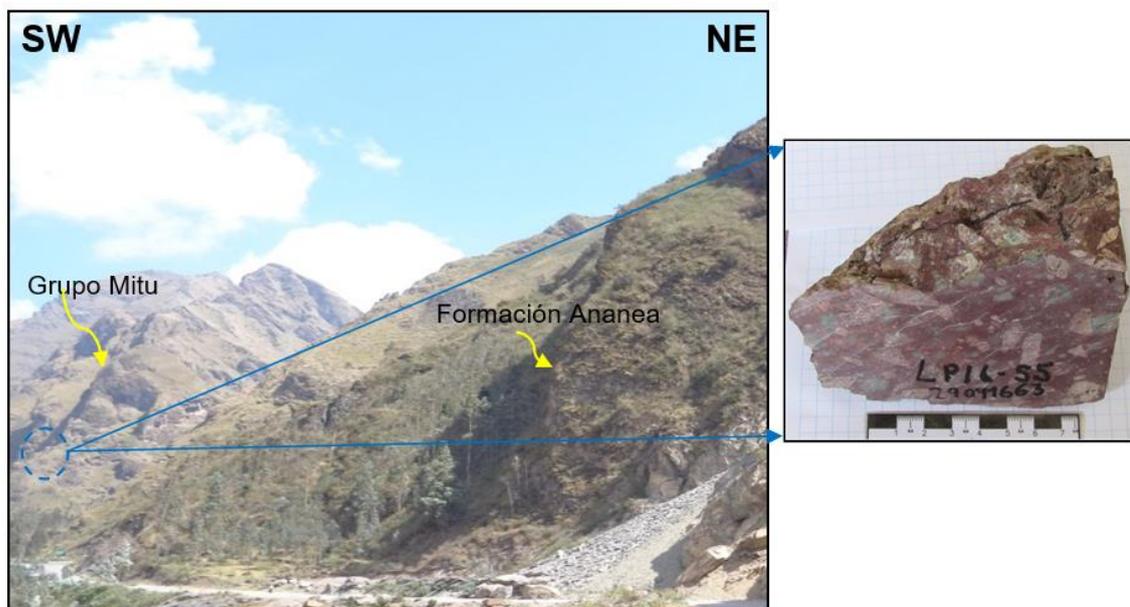
5.1.9. Muestra: LP16-55

En afloramiento es una roca félsica volcánica de color rojizo a pardo que varían según el grado de intemperismo. Presentan textura porfirítica, por lo que es

posible reconocer a simple vista fenocristales de feldespatos con tamaños de hasta 1.50cm en una matriz afanítica. Estratigráficamente ocurre como intrusión de la formación Sandía, además de encontrarse en contacto junto a la sienita nefelinica, en alrededores del puente San Francisco, en el margen derecho del río Ollachea y el margen izquierdo del río Macusani.

Figura 52

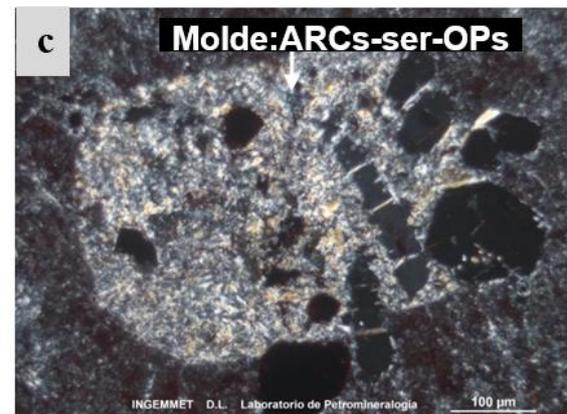
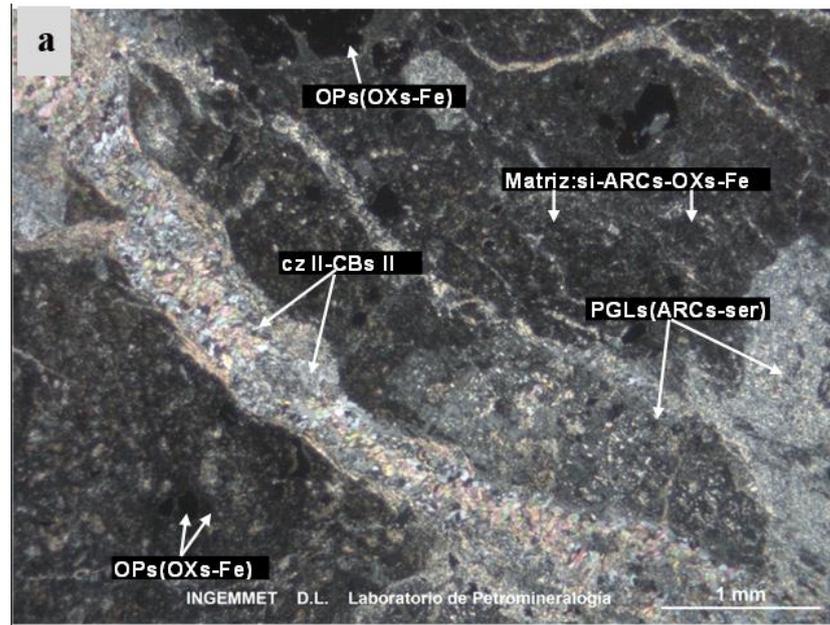
Afloramiento del Grupo Mitu en Cercanías al Puente San Francisco-Ollachea.



A. Estudio petrográfico

Clasificación: ANDESITA PORFIRITICA. **Texturas:** Porfirítica

La roca esta conformada por fenocristales de plagioclasas, moldes de feldespatos y con minerales opacos diseminados; distribuidos en matriz criptocristalina de sílice, arcillas y óxidos de hierro. Además, está cortada por vetillas de cuarzo y carbonatos secundario. La muestra presenta alteración por arcillas, sericita, carbonatos y óxidos de hierro.



Fotomicrografías N° 11: **a.** Plagioclasas con alteración a arcillas y sericita: PGLs(ARCs-ser), cortados por vetillas de cuarzo II y carbonatos II: cz II-CBs II; en una matriz microcristalina a criptocristalina de sílice, arcillas y óxidos. Con diseminación de minerales opacos alterados a óxidos de hierro: OPs(OXsFe). **b.** venilla de carbonatos II y cuarzo II: CBs II-cz II. **c.** Molde de cristal reemplazado por arcillas y sericita, con minerales opacos como inclusiones: Molde: ARCs-ser-OPs.

Tabla 21

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-55.

| Esenciales | % | Accesorios | % | Matriz | % | Secundarios | % |
|-----------------------|---|------------------|---|---------------------------|---|------------------------------------|---|
| Plagioclasas | | Minerales opacos | | Material criptocristalino | | Arcillas | |
| Feldespatos potásicos | | Cuarzo I/apatito | | | | Sericitas | |
| | | | | | | Carbonatos I-II, Micas y Cuarzo II | |



5.1.10. Muestra: LP16-46

Afloramientos del complejo San Gaban correspondiente a roca ígnea intrusiva metamorfizada, se encuentra como intrusión que intercepta a la formación Sandia en el sector de Joropiña y en la parte alta de Ccoloyoc; sin embargo, se observan abundantes cantos rodados con tamaños de hasta 3m, en el margen izquierdo del río Oscocachi en la zona de Cuncurayoc y Jupuna-Chullu. Por su alta compacidad y dureza fuerte, es aprovechada generalmente para la construcción de Quembaletes para la molienda artesanal de roca fragmentada para la recuperación de oro.

Según los afloramientos de esquistos porfidoblástico y micáceo en la zona de Ccoloyoc, se asume que la granodiorita intruyó a la formación Sandia produciendo metamorfismo de contacto en las pizarras. Además, este intrusivo fue metamorfizado debido a los esfuerzos compresivos que afectaron el área de estudio, evidenciando una vez más que Ollachea y alrededores fueron afectados por la tectónica.

Figura 53

Cantos Rodados de Granodiorita en la Zona de Jupuna-Chullu y Cuncurayoc.



Figura 54

Muestra de Mano del Complejo San Gaban. LP16-46.

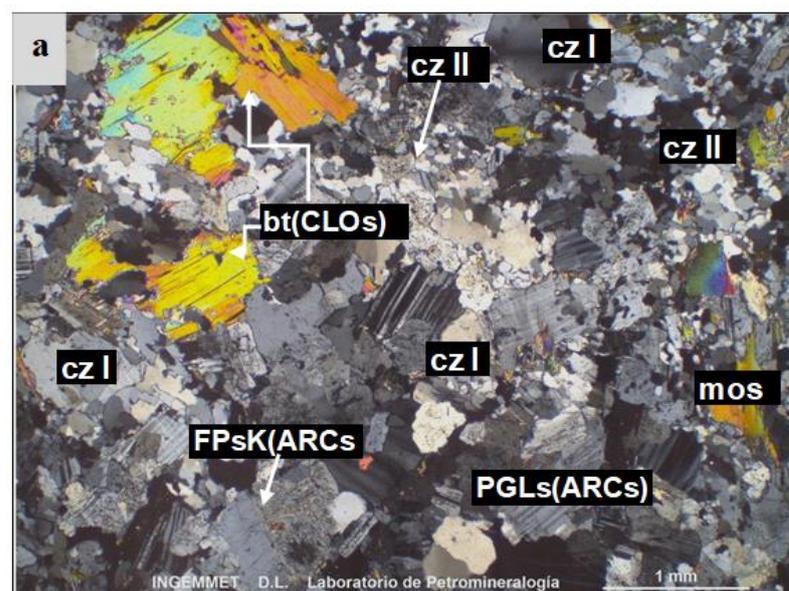


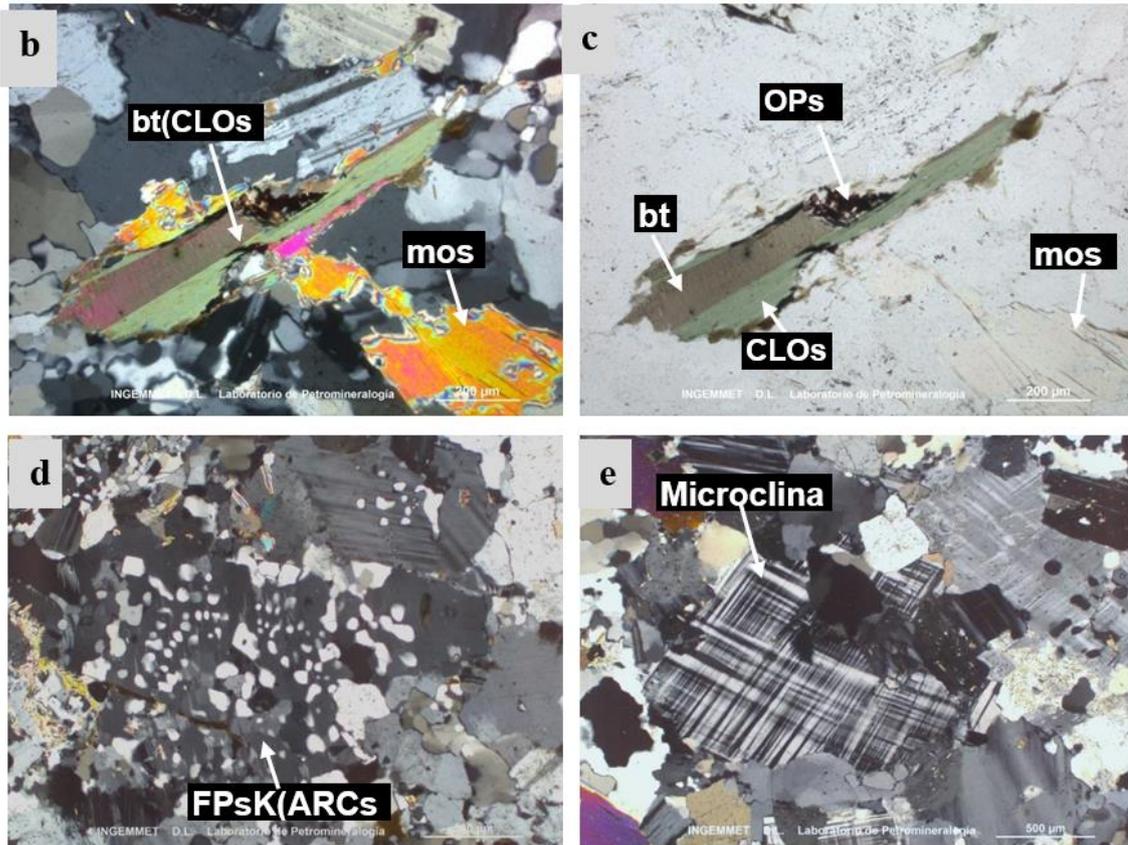
En **a** se observa un canto rodado de metagranodiorita, utilizado en la construcción de “quembraletes”. En **b** se observa muestra de mano para el estudio petrográfico.

A. Estudio Petrográfico

Clasificación: META-GRANODIORITA. Texturas: Granoblástica. Tipo de metamorfismo: Regional.

La muestra esta constituida por plagioclasas macladas y deformadas, algunos con extinción ondulante, débilmente alterados por arcillas y carbonatos; cuarzo primario con extinción ondulante, con sus bordes suturados y recrystalizados a cuarzo secundario finos, por sectores formando puntos triples; feldespatos potásicos en su variedad de microclina con sus bordes suturados, débilmente alterado por arcillas y sericita; cristales y blastos de moscovita con bordes suturados, además están flexionados con extinción ondulante, asociados a biotita. Así mismo se presentan en menor proporción cristales de biotita con bordes suturados, asociados a moscovita, están débilmente alterados a cloritas; escasa diseminación de minerales opacos asociados a biotita; además de trazas de zircón y apatito, como inclusiones de biotita y feldespatos respectivamente. En general la muestra está alterada por cloritas, arcillas, sericita, carbonatos y óxidos.





Fotomicrografías N° 12: a. Cristales de cuarzo I y II: cz I-cz II; plagioclasas y feldspatos potásicos alteradas a arcillas: PGLs(ARCs) - FPsK(ARCs); cristales de moscovita: mos, biotita alterada a cloritas:bt(CLOs). **b. y c.** Cristal de biotita alterado a cloritas: bt(CLOs) y reemplazado por minerales opacos: OPs; moscovita: mos. **d.** Feldespato potásico intercrecido con cuarzo, textura grafica. **e.** Microclina alterados a arcillas: FPsK(ARCs), con maclado tipo rejilla.

Tabla 22

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-46.

| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|---------------------|----------|-------------------|----------|---------------|----------|---------------------------------|----------|
| Plagioclasas | 32 | Biotita | 3 | Zircón | - | cloritas | 2 |
| Cuarzo I | 25 | Minerales opacos | 1 | Apatito | - | Arcillas, Sericita y Carbonatos | 3 |
| Cuarzo II | | | | óxidos | - | | |
| Feldespato potásico | 24 | | | | | | |
| Moscovita | 10 | | | | | | |

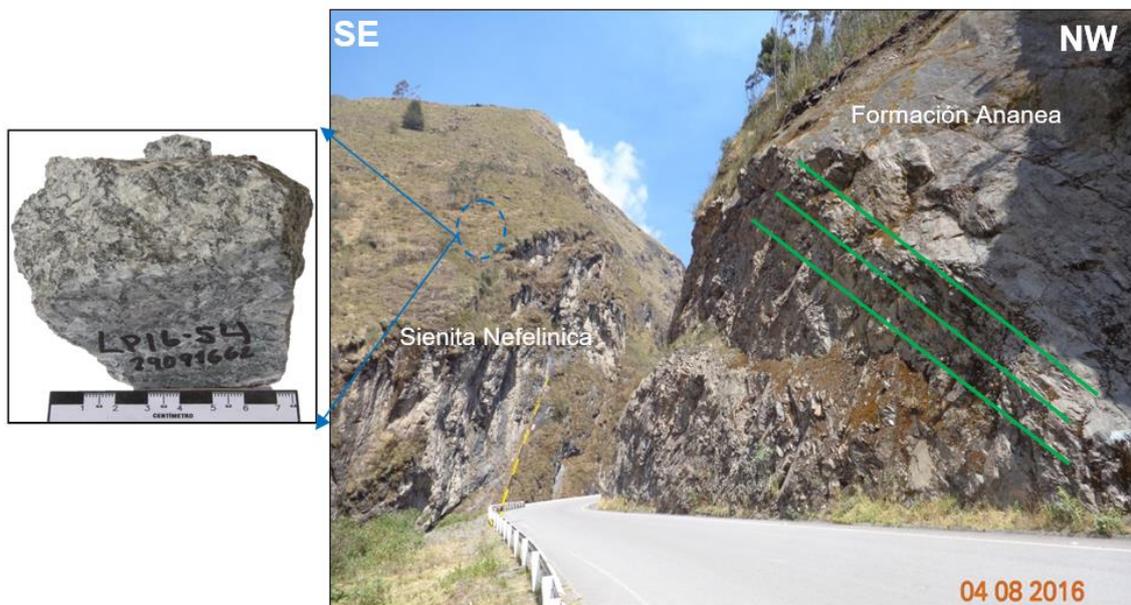
5.1.11. Muestra: LP16-54

El afloramiento se encuentra en la zona de Ccollpapampa, cerca al puente San Francisco, fácilmente visible por los cortes de la carretera interoceánica,

intruyendo a la formación Ananea y Sandía, donde actualmente se presentan intensos deslizamientos de rocas de la formación Ananea, ocasionado por el intrusivo fuertemente fracturado, que ha desestabilizado esta formación, además de sus planos de debilidad según la foliación de la roca que coadyuvan a los desprendimientos. Al Sur del puente San Francisco se hallan en contacto con los volcánicos del grupo Mitu, prueba de ello se observa abundantes cantos rodados dentro de los márgenes del río Ollachea.

Figura 55

*Zona de Contacto Entre la Formación Ananea y el Intrusivo de Sienita Nefelinica,
Cortados por el Rio Ollachea.*

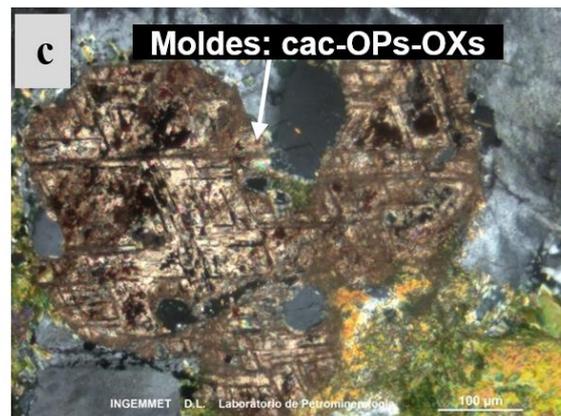
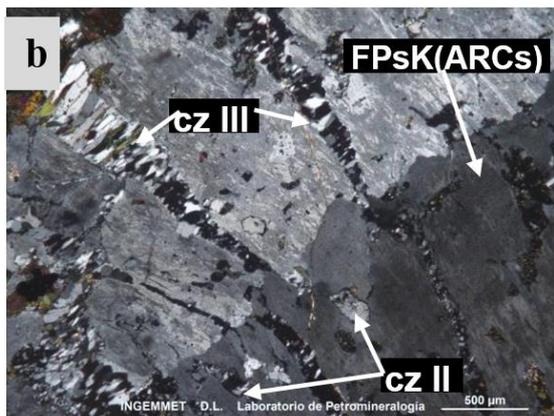
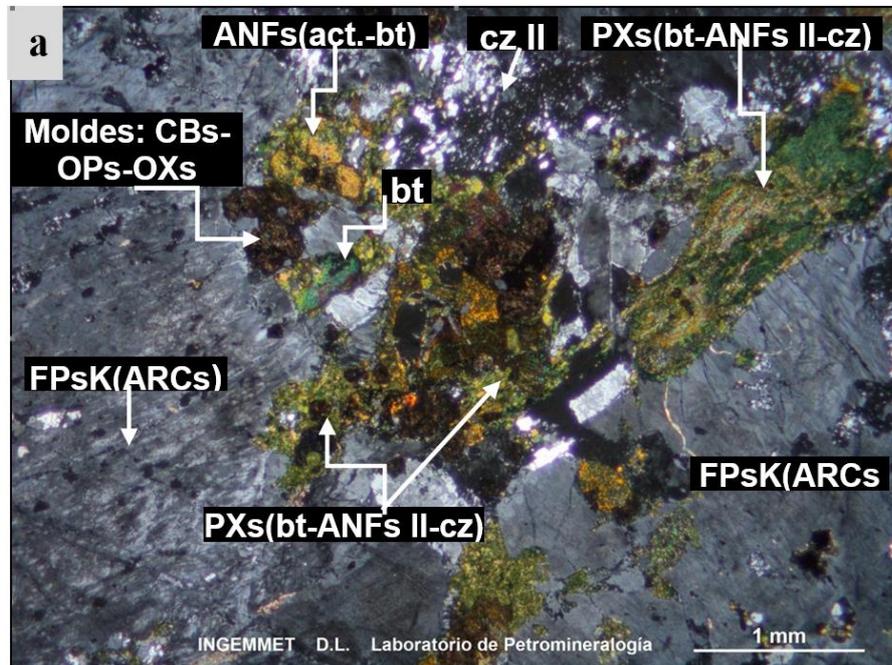


A. Estudio Petrográfico

Clasificación de la roca: SIENITA NEFELINICA. **Texturas:** Granular alotriomórfica

La roca esta constituida principalmente por feldspatos potásicos, con accesorios de plagioclasas, cuarzo, biotitas, piroxenos, anfíboles y moldes de

ferromagnesianos; con venillas de cuarzo III y minerales opacos disseminados y asociados a biotitas. Se encuentra alterada débilmente por arcillas, sericita, cloritas, cuarzo II.



Fotomicrografía N° 13: a. Feldspatos potásicos alterados a arcillas, de forma intersticial piroxenos alterados por biotita, anfíboles II y cuarzo: PXs(bt-ANFs II-cz); anfíboles I con alteración por biotita y actinolita: ANFs I(act-bt); molde de ferromagnesianos reemplazados por carbonatos, minerales opacos y óxidos: Molde:CBs-OPs-OXs; cuarzo secundario:cz II. b. Fenocristal de feldspato potásico alterado a arcillas: FPsK(ARCs), este a su vez se encuentran cortada por venillas de cuarzo III: cz III, además presenta subgranos recrystalizados de cuarzo secundario: cz II. c. Molde de cristales reemplazados por calcita, minerales opacos y óxidos: Molde: CBs-OPs-OXs.

Tabla 23

Composición Mineralógica por Microscopia Óptica. Muestra LP16-54.

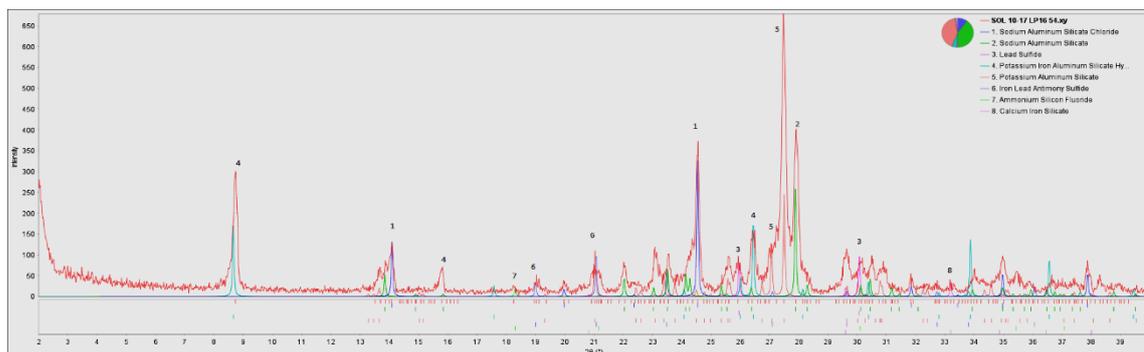
| Esenciales | % | Accesorios | % | Trazas | % | Secundarios | % |
|-----------------------|----|----------------------------|---|--------|---|---|---|
| Feldespatos potásicos | 50 | Biotita | 5 | | | Cloritas | 3 |
| Nefelita | 10 | Sodalita | 3 | | | Anfiboles II | 3 |
| Piroxenos | 8 | Plagioclasa | 3 | | | Cuarzo III | 3 |
| | | Moldes de ferromagnesianos | 2 | | | Cuarzo II | 2 |
| | | Cuarzo I | - | | | Carbonatos | 2 |
| | | | | 1 | | Actinolita, arcillas, epidota y Oxidos de hierro | 4 |

B. Estudio por Difracción de Rayos X

A continuación, se muestra el resultado de difracción de rayos X plasmado en el siguiente difractograma con las firmas espectrales de los componentes de la roca, además de la determinación cualitativa y cuantitativamente de los minerales que constituyen la roca.

Figura 56

Difractograma de la Muestra LP16-54. Intrusivo Sienita Nefelinica.



A continuación se presentan la lista de minerales obtenidos a partir del análisis de los difractogramas obtenidos:

Tabla 24

Composición Mineralógica por DRX. Muestra LP16-54.



CODIGO DE MUESTRA: LP16-54

| Nº | MINERAL | FÓRMULA | % |
|-------|----------------|---|-------|
| 01 | Microclina | KAlSi_3O_8 | 38.50 |
| 02 | Albita | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 23.34 |
| 03 | Sodalita | $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$ | 20.44 |
| 04 | Annita | $\text{K}_2(\text{Fe}_5^{+2}\text{Al})\text{Si}_5\text{Al}_3\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ | 15.42 |
| 05 | Galena | PbS | 0.77 |
| 06 | Andradita | $\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{+3}(\text{SiO}_4)_3$ | 0.60 |
| 07 | Cryptohalita | $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ | 0.51 |
| 08 | Parajamesonita | $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{13}$ | 0.43 |
| Total | | | 100 |

5.2. ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS

Para realizar este estudio, fueron seleccionados tres muestras representativas de la formación Ananea, que corresponden al sector de Balcon, Minapampa y Cuncurayoc, los cuales presentan ocurrencia de mineralización de oro; además cabe destacar que la mineralización está asociado al cuarzo, este último es óptimo para caracterizar las inclusiones fluidas. A continuación, se presenta y describe cada uno de los estudios realizados para cada muestra, con el fin de relacionar las inclusiones fluidas con la mineralización de oro.

Figura 57

Puntos de Muestreo Para el Estudio de Inclusiones Fluidas.



5.2.1. Muestra: LP16-IF-MC01

“Afloramientos de pizarras pertenecientes a la formación Ananea, se presentan en gran extensión en la zona de Minapampa, en muchos casos expuesto por los trabajos de minería artesanal, además se presenta abundantes desmontes de material rocoso extraídos desde subterráneo. La orientación de estos afloramientos mantiene su rumbo principal de E a W, con buzamiento al N; son cortados por diversas vetas de cuarzo, generalmente con rumbos subparalelos a la dirección de foliación de la roca caja. En las labores subterráneas se observó que la roca caja mantiene su dirección paralela a la de las vetas de cuarzo, en algunos casos se observa zonas de fallas locales, evidenciados por presencia de panizo y estrías; así mismo se aprecia los efectos de deformación de la roca producidos por el tectonismo, mostrando algunas vetas con orientación deformada y de formas

sinuosas. Es preciso resaltar la presencia de filtraciones de agua, en muchos casos generados a partir del río Oscocachi o por aguas superficiales infiltrados en las labores de minería, producto de ello se observa alteración de sulfuros a óxidos de hierro, en torno a vetas”.

Figura 58

Veta de Cuarzo Asociado a Sulfuros, con Dirección Paralela a la Foliación de la Roca, en Zona de Minapampa.

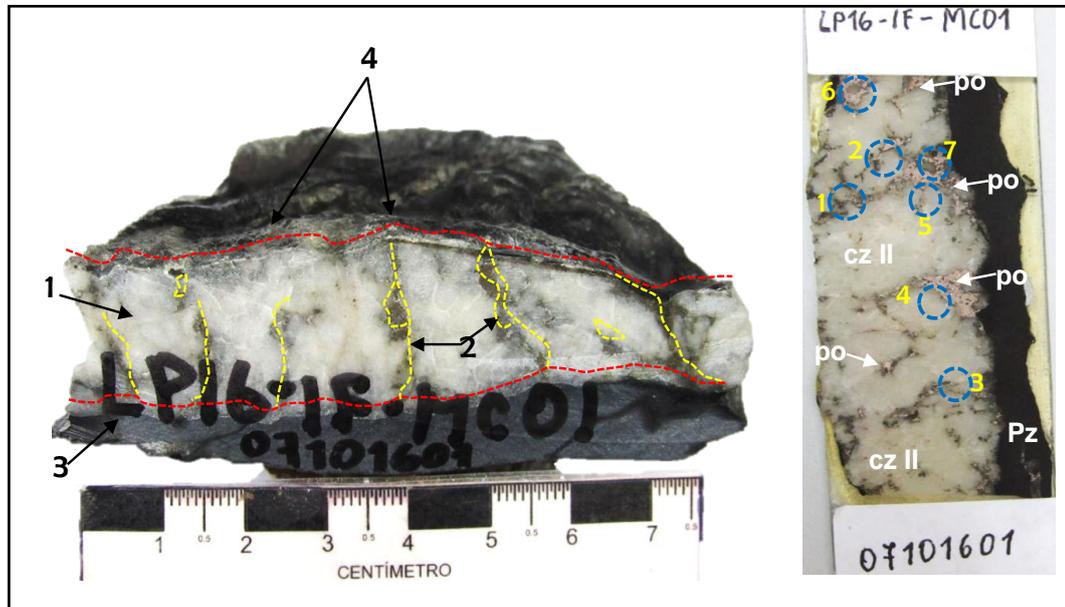


Descripción Macroscópica

“La muestra corresponde a una Pizarra. **1.** Veta constituida por cuarzo II, asociado a cloritas, cuarzo III y óxidos de hierro. **2.** Fracturas rellenas por pirrotita, asociado a pirita-calcopirita-arsenopirita y cloritas-óxidos de hierro. **3.** Roca caja de naturaleza metamórfica de textura foliada. **4.** Zona de contacto entre roca caja y veta, donde se muestra parches de sericita, producto de alteración”.

Figura 59

Muestra de Mano y Sección Delgada Doblemente Pulida de la Muestra LP16-IF-MC01.



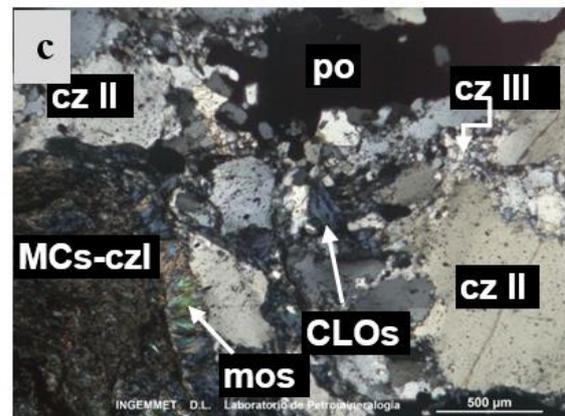
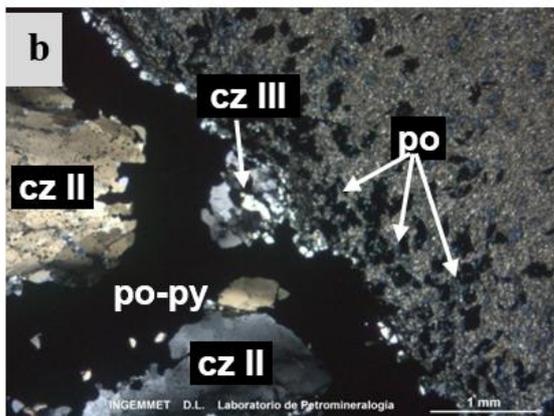
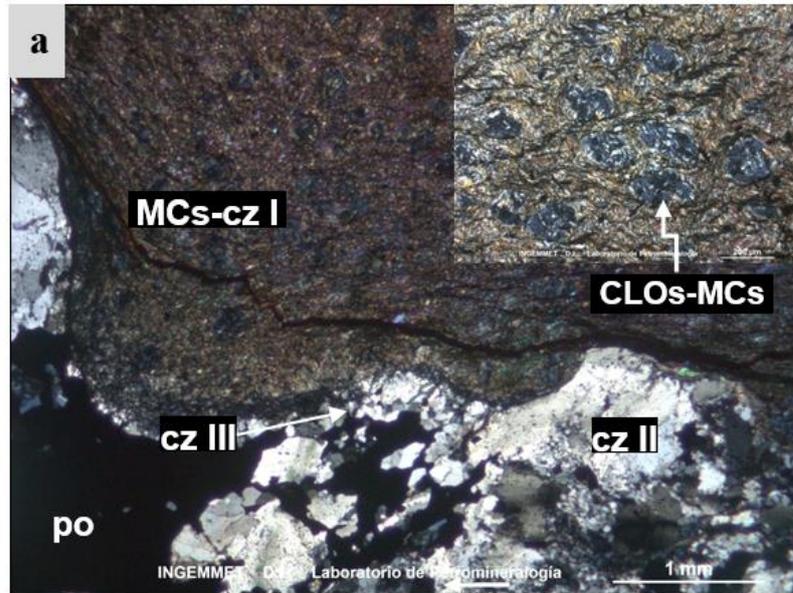
“Además, se observa la sección delgada doblemente pulida, preparada a partir de la muestra de mano, donde se ha seleccionado diferentes **Campos** : 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 que corresponde a la veta de cuarzo, el cual contiene inclusiones fluidas menores a 30 μm ”.

5.2.1.1. Estudio Petrominerográfico “

Minerales: Pirrotita, pirita, calcopirita, esfalerita y oro nativo.

Texturas: De relleno y de disseminación

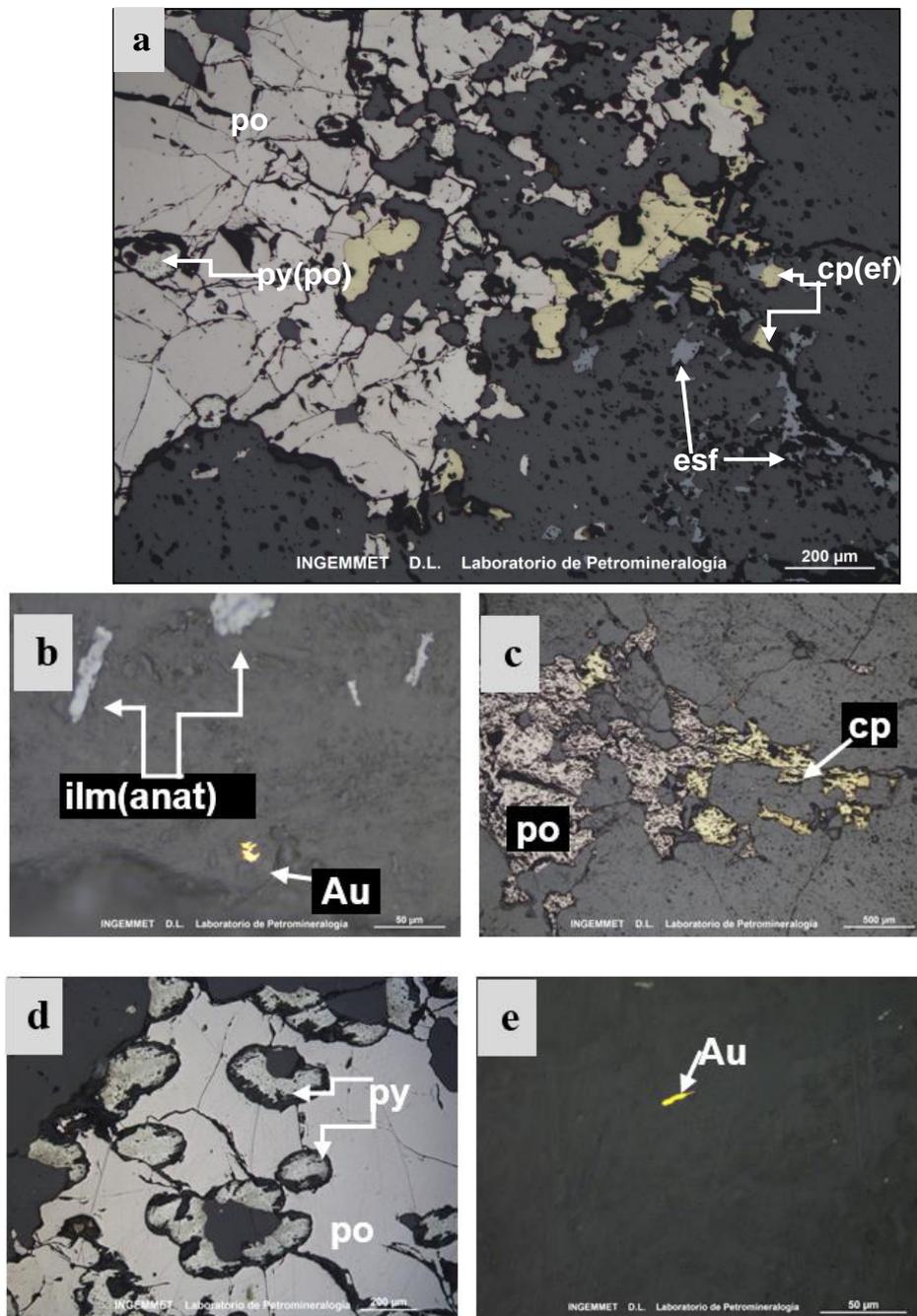
La roca caja esta conformada por blastos de micas, cuarzo I, esfena y disseminación de pirrotita y oro nativo ligeramente alineados según la dirección de foliación, además está cortada por una veta de espesor 2 cm, conformada por cuarzo II y sulfuros como pirrotita-pirita-calcopirita-esfalerita-goethita, asociado a cloritas y sericita.



Fotomicrografía N° 14: a. Roca caja(pizarra) conformada principalmente por micas, andalucita y cuarzo I: MCS-cz I, interceptada por una veta de cuarzo II-III, asociado a cloritas y pirrotita: po. Además, nódulos de cloritas y micas ligeramente orientadas: CLOs-MCs. b. Contacto entre veta y roca caja, se presentan agregados de pirrotita y pirita en veta, además de estar diseminados en roca caja, asociados a cuarzo II y III. c. Veta de cuarzo II y III, asociado a cloritas y pirrotita:po.

La mineralogía económica está dada por relleno de **pirrotita**-pirita y calcopirita-esfalerita, dentro de microfracturas de veta de cuarzo, además se observa pirita reemplazada por agregados de pirrotita, los cristales de calcopirita están reemplazados por esfalerita, asociados a agregados de cloritas, cuarzo III, sericita y goethita. Ocasionalmente se observa diseminación de cristales deformados y alargada de **oro** nativo dentro de

la roca caja en cercanías al contacto con la veta, presenta tamaños menores a 0,01mm.



Fotomicrografía N° 15: a. Cristales de pirrotita(po) reemplazando cristales de pirita(py), asociados a calcopirita(cp) reemplazados por esfalerita(ef), como relleno de fracturas. b. Cristales de ilmenita alterados a óxidos de titanio: ilm(anat), y **oro nativo:** Au, dentro de roca caja. c. Agregados de pirrotita:po asociado con calcopirita: cp. d. cristales de pirita: py reemplazados por pirrotita: po e. Oro nativo: Au en roca caja.”

Paragénesis según las texturas:

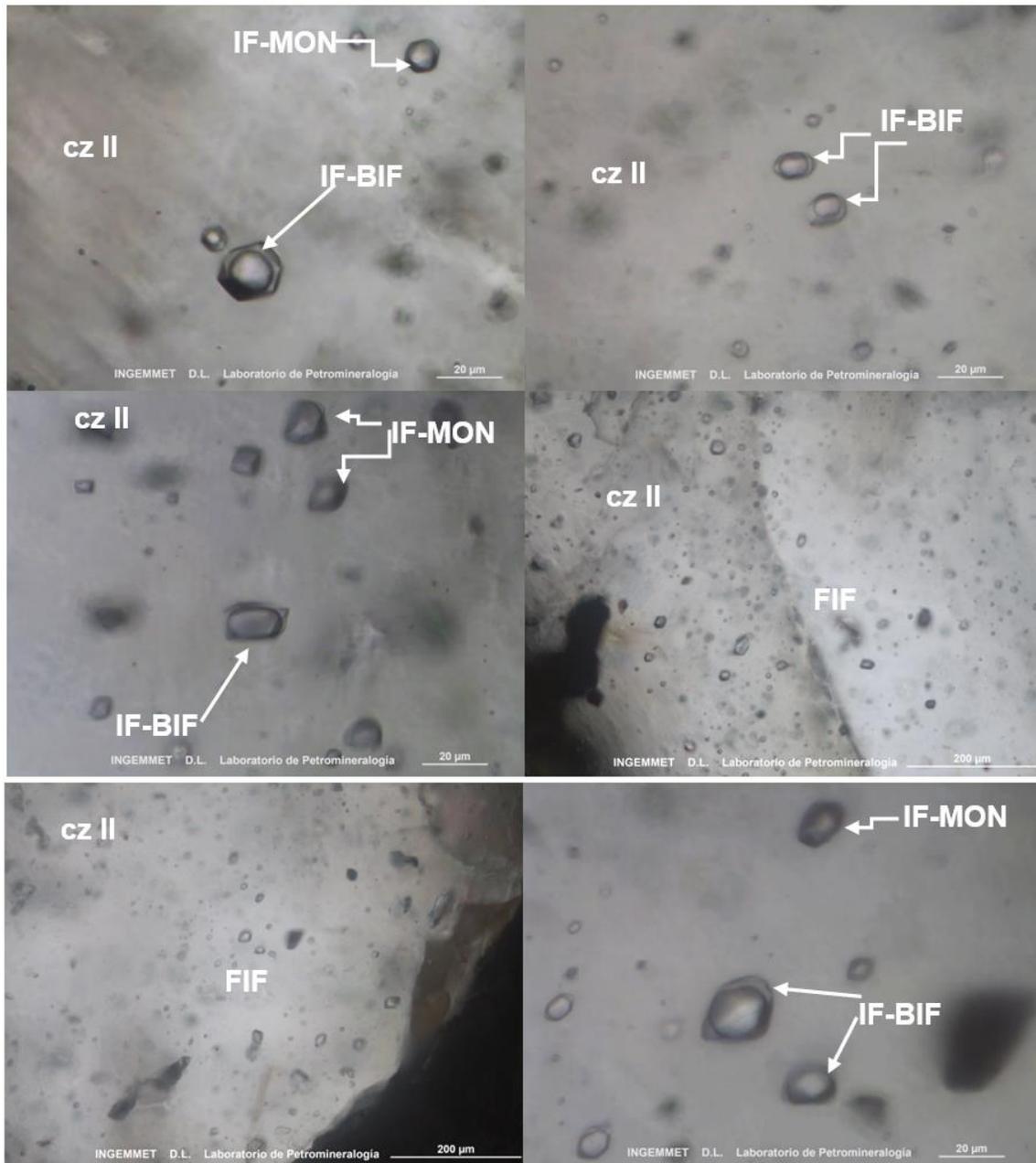
Ilmenita-Pirita-Calcopirita-Esfalerita-Pirrotita-Oro -Goethita

5.2.1.2. Petrografía de inclusiones fluidas

“El estudio de las IF se realizó en cristales de cuarzo II que son constituyente principal de la veta, los cuales fueron óptimos para la selección de los distintos campos de estudio relacionados con la mineralización de **oro**, donde se encontraron IF bifásicas y monofásicas con tamaños menores a 37 μm y 25 μm respectivamente. A continuación el estudio petrográfico de las inclusiones fluidas en los 7 campos observados:”

Tabla 25*Características Petrográficas de Inclusiones Fluidas-Muestra LP16-IF-MC01.*

| Campo | Clasificación | Forma | Tipo | Relleno(%) | Tamaño(μm) |
|--------------|----------------------|--------------|-------------|-------------------|---|
| 1 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.85 | ≤ 27 |
| | P-Monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 25 |
| 2 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.90 | ≤ 37 |
| | P-Monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 21 |
| 3 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.75 | ≤ 16 |
| | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.90 | ≤ 26 |
| 4 | P-bifásica | Regulares | Líquido | 0.30 | ≤ 18 |
| | P-bifásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 21 |
| 5 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.95 | ≤ 18 |
| 6 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.85 | ≤ 30 |
| 7 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.80 | ≤ 15 |



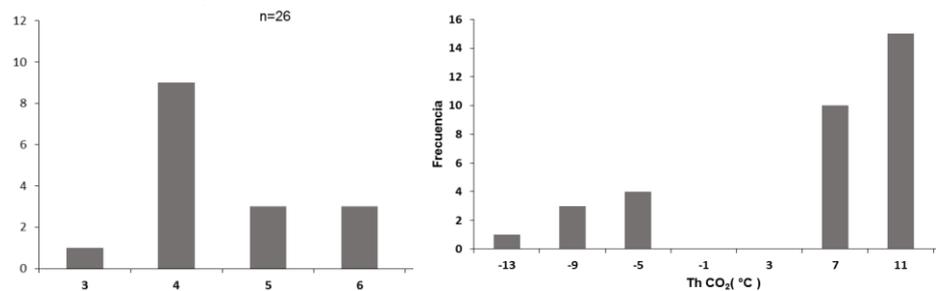
Fotomicrografías N° 16. “Familia de inclusiones fluidas(FIF) primarias bifásicas(IF-BIF) y monofásicas(IF-MON) ricas en vapor(possible CO₂), ocurren dispersos y alineados según planos de crecimiento en cristales de cuarzo II: cz II que rellenan vetas que cortan la roca caja.”

5.2.1.3. Análisis Microtermométrico

Tf de clatratos-Th del CO₂.

Figura 60

Temperatura de Fusión de Clatratos-Temperatura de Homogeneización del CO₂.



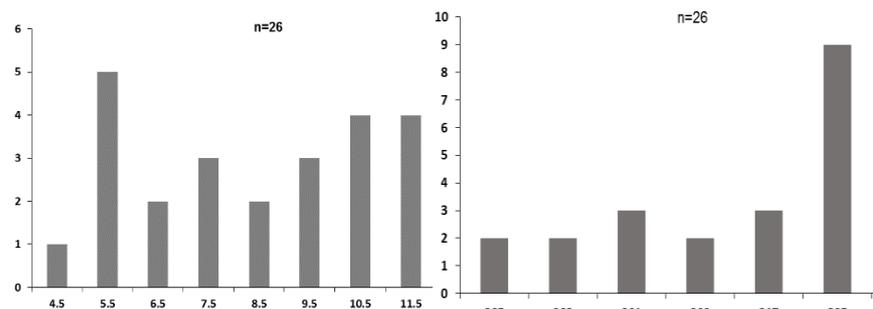
“En los gráficos se aprecia dos poblaciones para la fusión de clatratos, uno alrededor de 4°C y el otro en torno a 7°C.

Se observa claramente dos poblaciones de IF para la temperatura de homogeneización del CO₂, uno alrededor de -9°C y el otro en torno a 10°C”.

Salinidad y temperatura de homogeneización total:

Figura 61

Salinidad y Temperatura de Homogeneización Total.

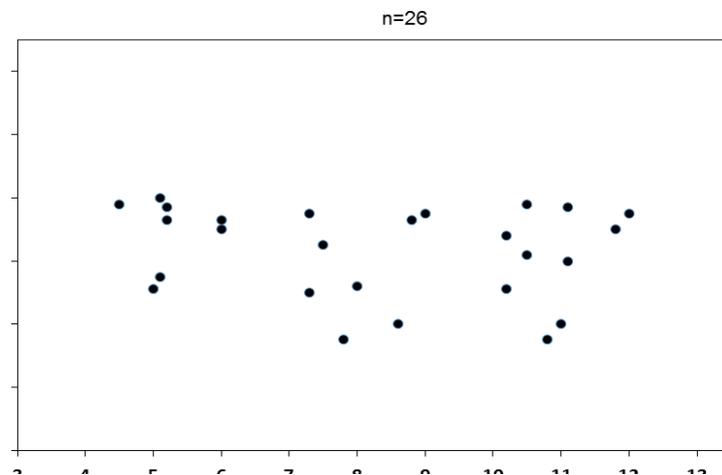


Obtenidos a partir de 26 inclusiones fluidas, expresado en porcentaje equivalente en peso de cloruro de sodio, se observa dos poblaciones, uno alrededor de 5.5 % y el otro en torno a 11% eq. peso NaCl. Con temperaturas de homogeneización, se observa dos poblaciones, uno alrededor de 301°C y el otro en torno a 325°C.

Gráfico de dispersión Th vs NaCl:

Figura 62

Temperatura de Homogeneización Total vs Salinidad.

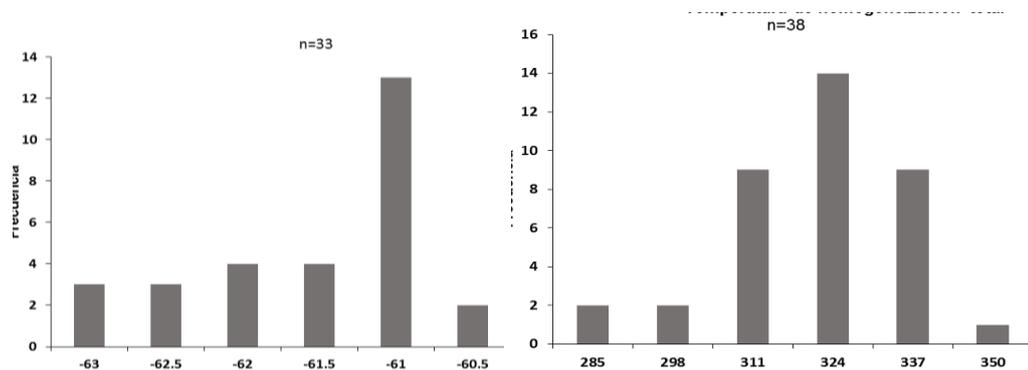


“En la figura se aprecia mezcla isotérmica de fluidos, con incremento de la salinidad desde 4% a 12%eq. peso NaCl. Primeramente, hubo un fluido con salinidad baja, esta fue incrementándose progresivamente, con temperaturas relativamente constantes, alrededor de 310°C.”

Tf del CO₂- Th total

Figura 63

Temperatura de Fusión del CO₂- Temperatura de Homogeneización Total.



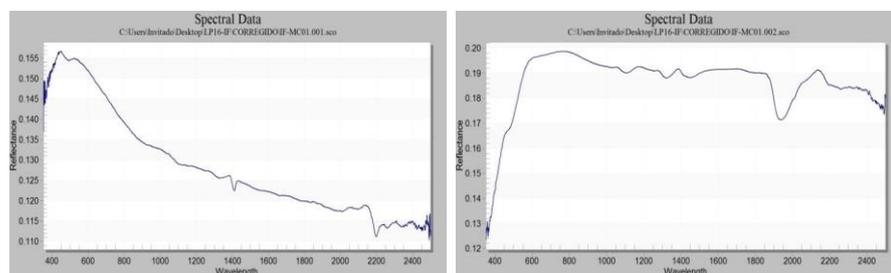
“Se observa una población de IF para la temperatura de fusión del CO₂, alrededor de -61°C. Se observa una población de IF para la Th total, alrededor de 324°C”.

5.2.1.4. Alteración Hidrotermal

“A continuación, se presenta dos espectros obtenidos a partir del análisis por mediante el equipo de TerraSpec.”

Figura 64

Difractograma de la Muestra LP16-IF-MC01.



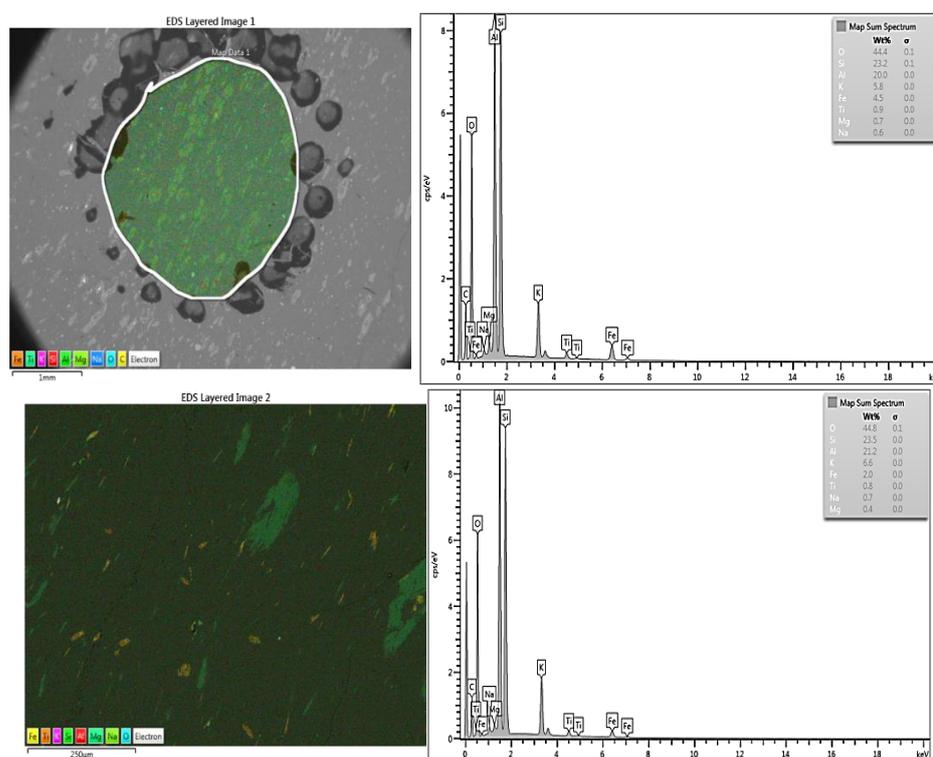
Se obtuvo la siguiente asociación mineralógica: Andalucita-Moscovita-Siderita-Goethita.

5.2.1.5. Estudio por Microscopia Electrónica de Barrido(MEB)

“Se ha realizado análisis de barrido areal, empleando el MEB, mediante el detector de electrones retrodispersos (EDS), donde se obtuvo la composición elemental de la roca caja Pizarra.

Figura 65

Área Analizada en la Roca Caja, Junto a Firmas Espectrales Elementales.



“Firmas espectrales del análisis elemental por barrido areal realizado en la roca caja, donde se observa alto contenido de oxígeno, silice y aluminio por la presencia de arcillas y micas, con bajos contenidos de potasio y hierro, además de trazas de titanio, magnesio y sodio”.

Figura 66

Análisis Puntual por MEB de Oxidos en la Misma Zona.

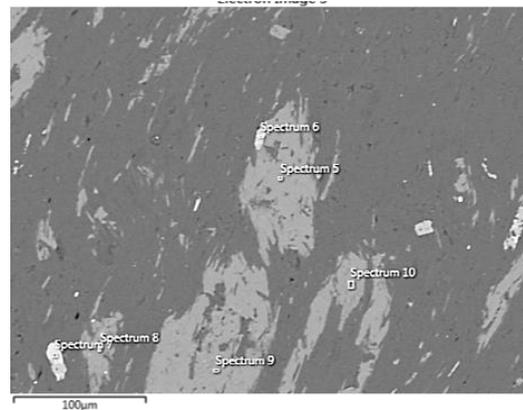
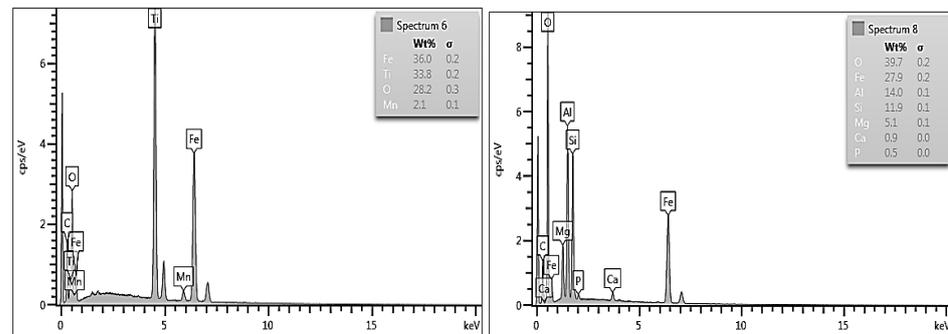


Figura 67

Análisis Elemental y Puntual del Espectro Número 6 y 8.



“Según los espectros del análisis elemental puntual en minerales opacos diseminados en la roca caja, se observa que corresponde a agregados de óxidos de hierro (espectro 8) que impregnan a la roca caja con alto contenido de oxígeno, silice y aluminio, asociados con escasas diseminaciones de ilmenita (espectro 6) con óxidos de manganeso”.

5.2.2. Muestra: LP16-IF-MC02

“Afloramientos de roca pizarra de la formación Ananea, en la zona de Cuncurayoc. Donde la orientación permanece constante con rumbo de E a W, en

ella se observa vetas de cuarzo subparalelas a la foliación de la roca caja, estas se encuentran deformadas, debido a los esfuerzos tectónicos que afectaron toda la zona de estudio. Esta zona de muestreo es importante debido a la ocurrencia de oro ampliamente corroborada tanto por los trabajos de minería artesanal como por trabajos de exploración realizados por empresas privadas. Superficialmente los afloramientos se encuentran cubiertos por material de desmonte en algunas zonas, debido a los trabajos de minería subterránea artesanal. Estas labores se realizan en ambas márgenes del río Oscocachi, siguiendo las vetas económicamente rentables.”

Figura 68

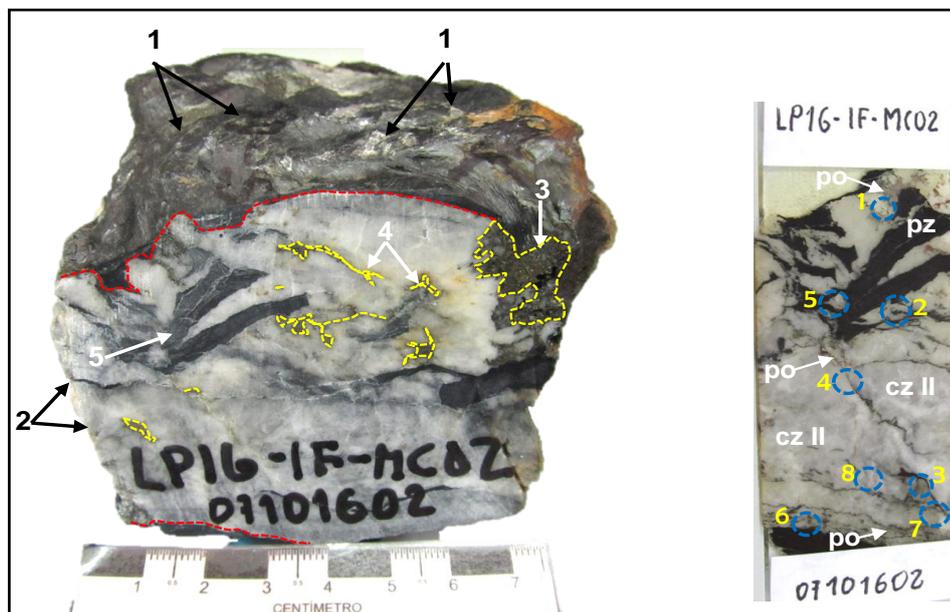
Punto de Muestreo en Cuncurayoc, en la Formación Ananea. Muestra LP16-IF-MC02.



“La muestra corresponde a una veta de cuarzo. **1.** Roca caja con parches de sericita, como producto de alteración. **2.** Veta de cuarzo con espesor de 6 cm, el cual corta la roca caja. **3.** Parches de pirrotita y pirita, alterados por óxidos de hierro, dentro de la veta de cuarzo. **4.** Fracturas dentro de la veta de cuarzo, rellena por pirrotita asociado a pirita y calcopirita, estos a su vez están alterados por óxidos de hierro. **5.** Fragmentos de la roca caja (pizarra), reemplazados y fracturados por la veta, algunos ligeramente deformados.”

Figura 69

Muestra de Mano y Sección Delgada Doblemente Pulida. Muestra LP16-IF-MC02.



“Además, se observa la sección delgada doblemente pulida, preparada a partir de la muestra de mano, donde se ha seleccionado diferentes **Campos** : 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 que corresponde a la veta de cuarzo, el cual contiene inclusiones fluidas menores a 17 μm ”.

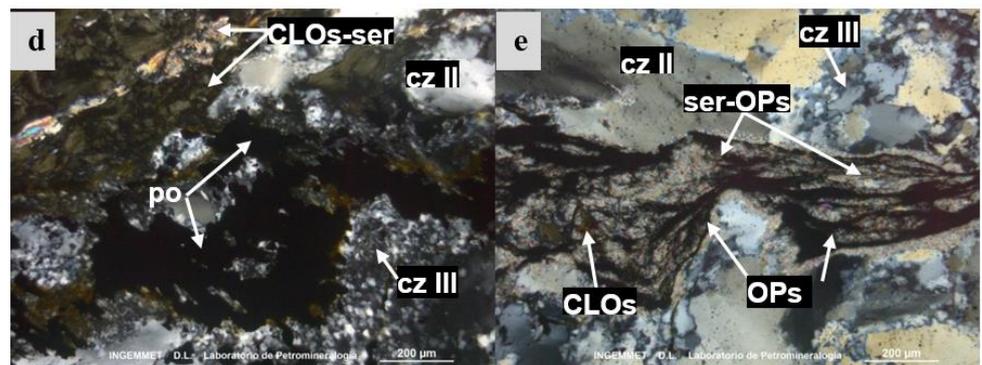
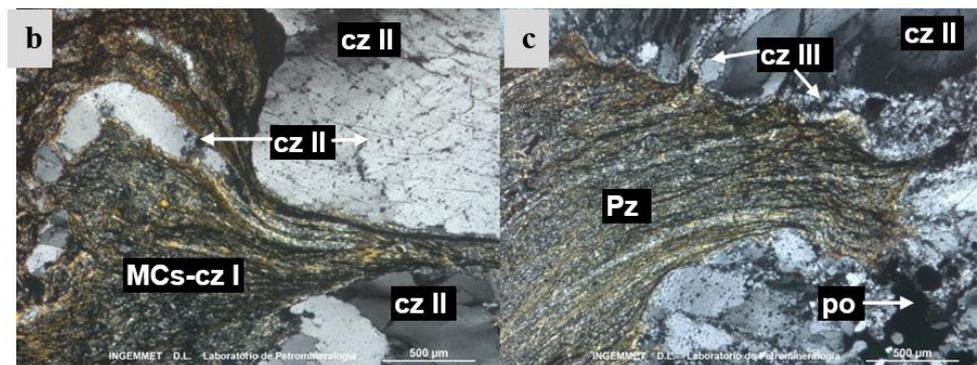
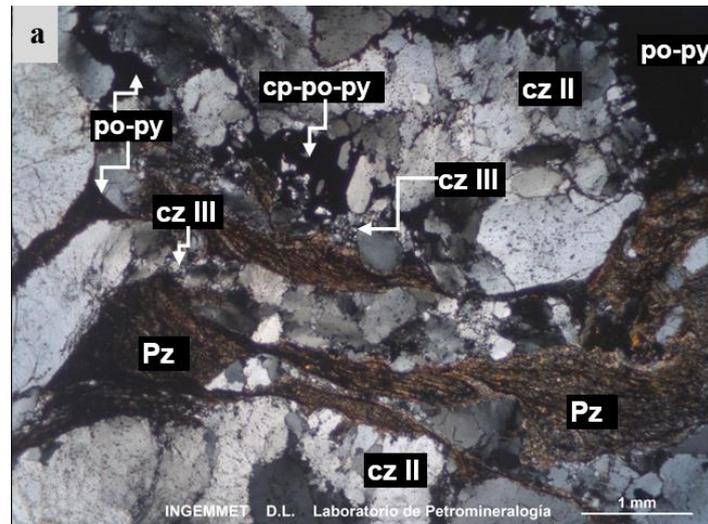


5.2.2.1. Estudio Petrominerográfico

Minerales: “Pirrotita, pirita, arsenopirita, calcopirita y oro.

Texturas: de relleno.

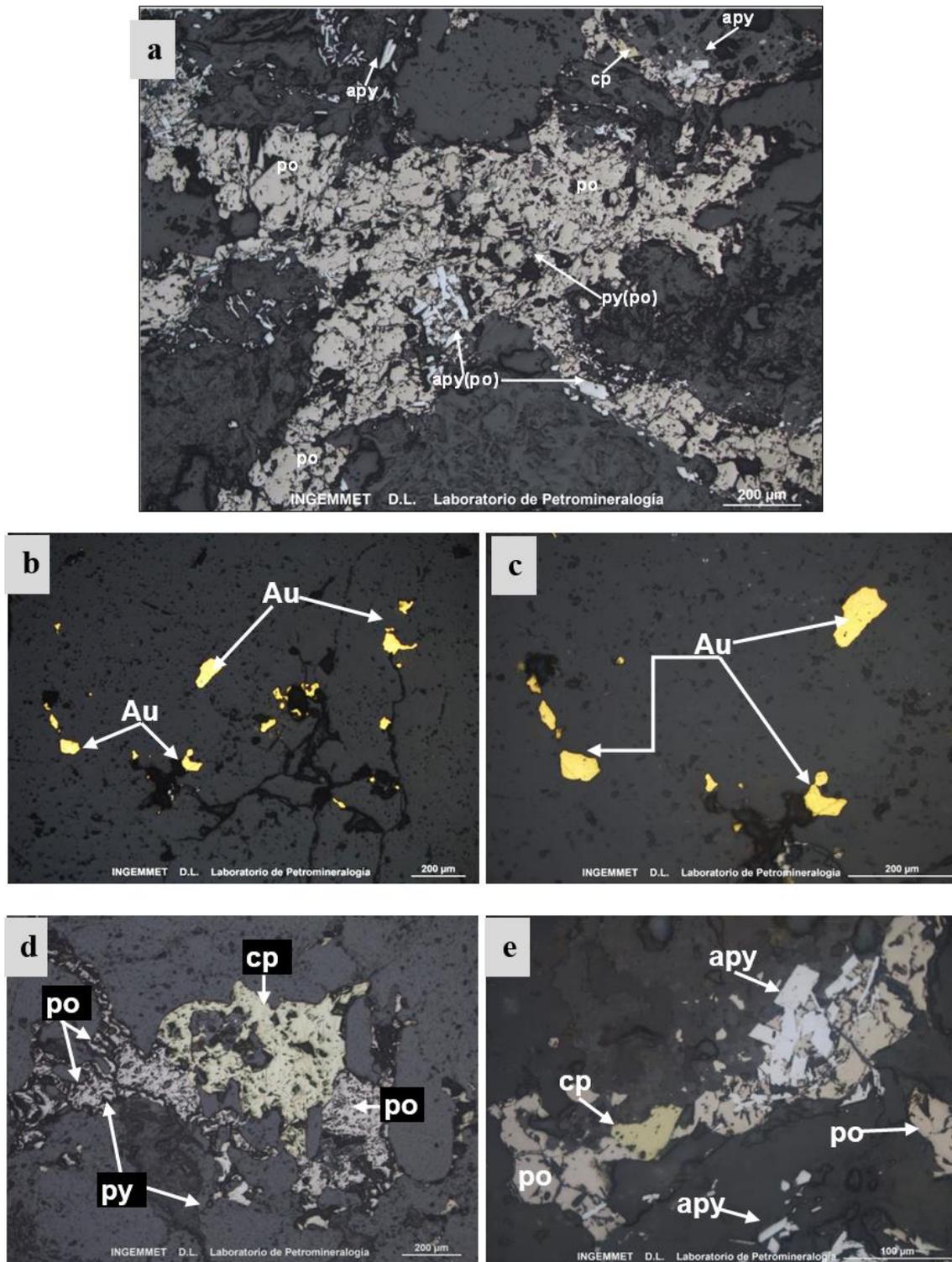
La muestra corresponde a una veta de cuarzo, la cual se encuentra cortando la roca caja correspondiente a una pizarra, además se observa fragmentos de pizarra dentro de la veta, muchos de ellos deformados, estos se presentan alterados a cloritas y sericita dentro de la zona de contacto.”



Fotomicrografías N° 17: a. “Estructura vetiforme conformada por agregados de cristales de cuarzo II y III: cz II-cz III, asociado a pirrotita:po, pirita:py y calcopirita:cp, además se presentan fragmentos de roca caja pizarra:Pz. b. y c. Fragmentos líticos conformados por micas y cuarzo:MCs-cz I con materia orgánica, junto a cristales de cuarzo II y III asociados a pirrotita: po, se encuentran deformados y microplegados. d. Agregados microescamosos de sericita:ser, asociado a cloritas:CLOs, y pirrotita: po, dentro de veta de cuarzo II y III:cz II-III. e. Minerales opacos:OPs, asociados a sericita y cloritas: CLOs-ser, englobados por cuarzo II y III:cz II-III”.



“La veta de cuarzo II-III, presentan parches de pirrotita y fracturas rellenas por **pirrotita**-pirita-arsenopirita, con traza de calcopirita; además dentro de un sector de la veta, se observa cristales libres de **oro** nativo con tamaños hasta de 0,22mm dentro de microfracturas de cuarzo II, asociada a **pirrotita**. Por sectores se observa cristales euhedrales de arsenopirita y pirita reemplazados por pirrotita, asociados a cuarzo II, Asimismo se aprecian cristales diseminados de esfena dentro de la roca caja”.



Fotomicrografía N° 18: a. “Agregado de cristales de pirrotita:po, reemplazando a arsenopirita:apy(po), junto con cristales de calcopirita reemplazados por pirrotita:cp(po). b. y c. Cristales de oro nativo:Au, relleno de fracturas. d. Agregado de cristales de pirrotita:po, reemplazando cristales de pirita:py, a su vez se encuentran reemplazados por calcopirita:cp. e. Cristales romboidales de arsenopirita reemplazados por pirrotita:apy(po), junto con cristales de calcopirita:cp”.

Paragénesis:

Esfena-Arsenopirita-Pirita-Calcopirita-Pirrotita-Oro

5.2.2.2. Estudio Petrográfico de inclusiones fluidas

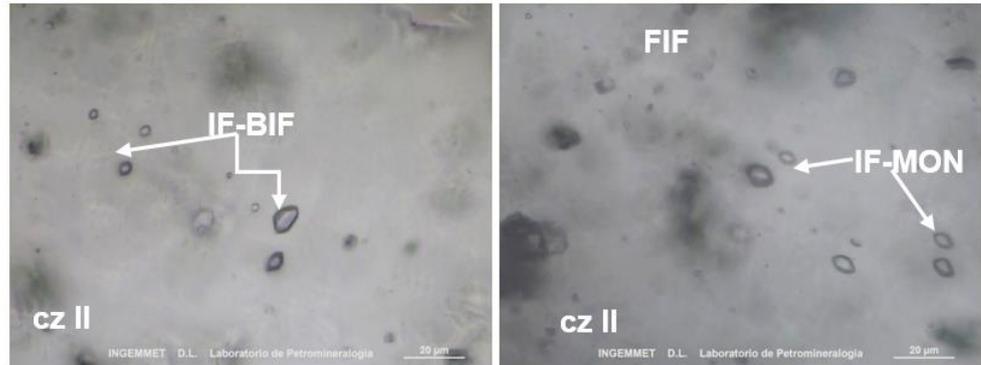
“El estudio de las IF se realizó en cristales de cuarzo II de la veta, donde se observaron 7 campos relacionados con la mineralización de **oro**, encontrándose IF bifásicas y monofásicas con tamaños menores a 11 μm y 17 μm respectivamente.

Características petrográficas de inclusiones fluidas-Muestra LP16-IF-MC02”

Tabla 26

Características Petrográficas de Inclusiones Fluidas-Muestra LP16-IF-MC02.

| Campo | Clasificación | Forma | Tipo | Relleno(%) | Tamaño(μm) |
|--------------|----------------------|--------------|-------------|-------------------|---|
| 1 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.90 | ≤ 12 |
| 2 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.90 | ≤ 10 |
| | P-Monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 11 |
| 3 | P-bifásica | Regualres | Vapor | 0.95 | ≤ 9 |
| 4 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.95 | ≤ 11 |
| 5 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.95 | ≤ 10 |
| 6 | P-monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 17 |
| 7 | P-monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 12 |



Fotomicrografías N° 41: “Familia de inclusiones fluidas(FIF), inclusiones fluidas monofasicas(IF-MON), inclusiones fluidas bifasicas(IF-BIF), ocurren dispersos y alineados en cristales de cuarzo II”.

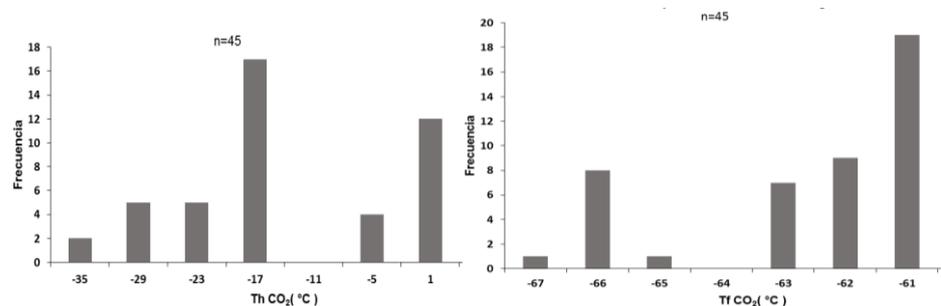
5.2.2.3. Análisis microtermométrico de inclusiones fluidas

“Es preciso aclarar que en esta muestra, no ha sido posible tomar datos de fusión de clatratos por ende no se presentan resultados de salinidad, en muchos casos debido al alto contenido de CO₂ en las inclusiones, además de presentar inclusiones monofasicas ricos en vapor”.

Temperatura de homogeneización y fusión de CO₂:

Figura 70

Histogramas Para Temperaturas de Fusión y Temperatura de Homogeneización de CO₂.



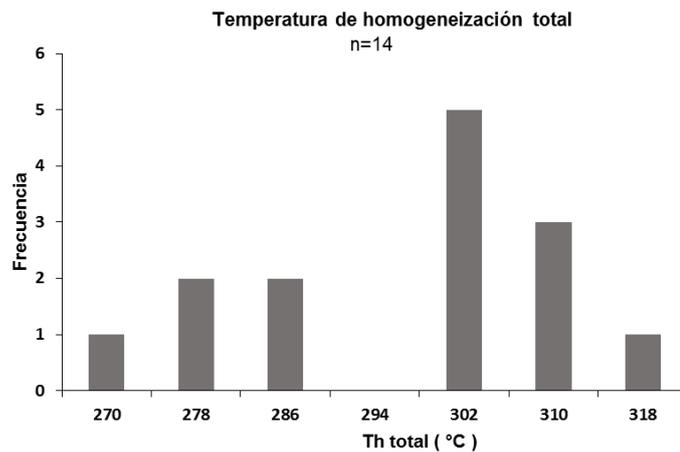
“En la figura se observa dos poblaciones de IF con Th parcial, el primero alrededor de -17°C y el segundo en torno a 1°C. Además, se

observa dos poblaciones de IF para la Tf de CO₂, el primero alrededor de -66°C y el segundo en torno a -61°C”.

Temperatura de homogeneización total:

Figura 71

Histograma de Temperatura de Homogeneización Total.



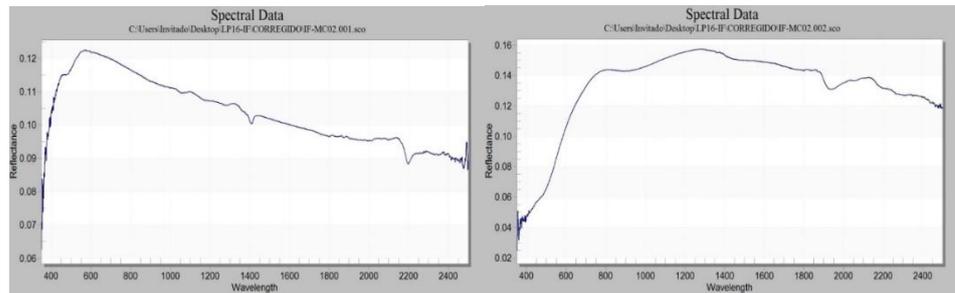
“Según el histograma se observa dos poblaciones de inclusiones fluidas para temperaturas de homogeneización, el primero alrededor de 278°C y el segundo en torno a 302°C”.

5.2.2.4. Estudio de alteraciones hidrotermales

“A continuación, se presenta dos espectros obtenidos a partir del análisis con el equipo de TerraSpec.

Figura 72

Difractogramas de la Muestra LP16-IF-MC02.



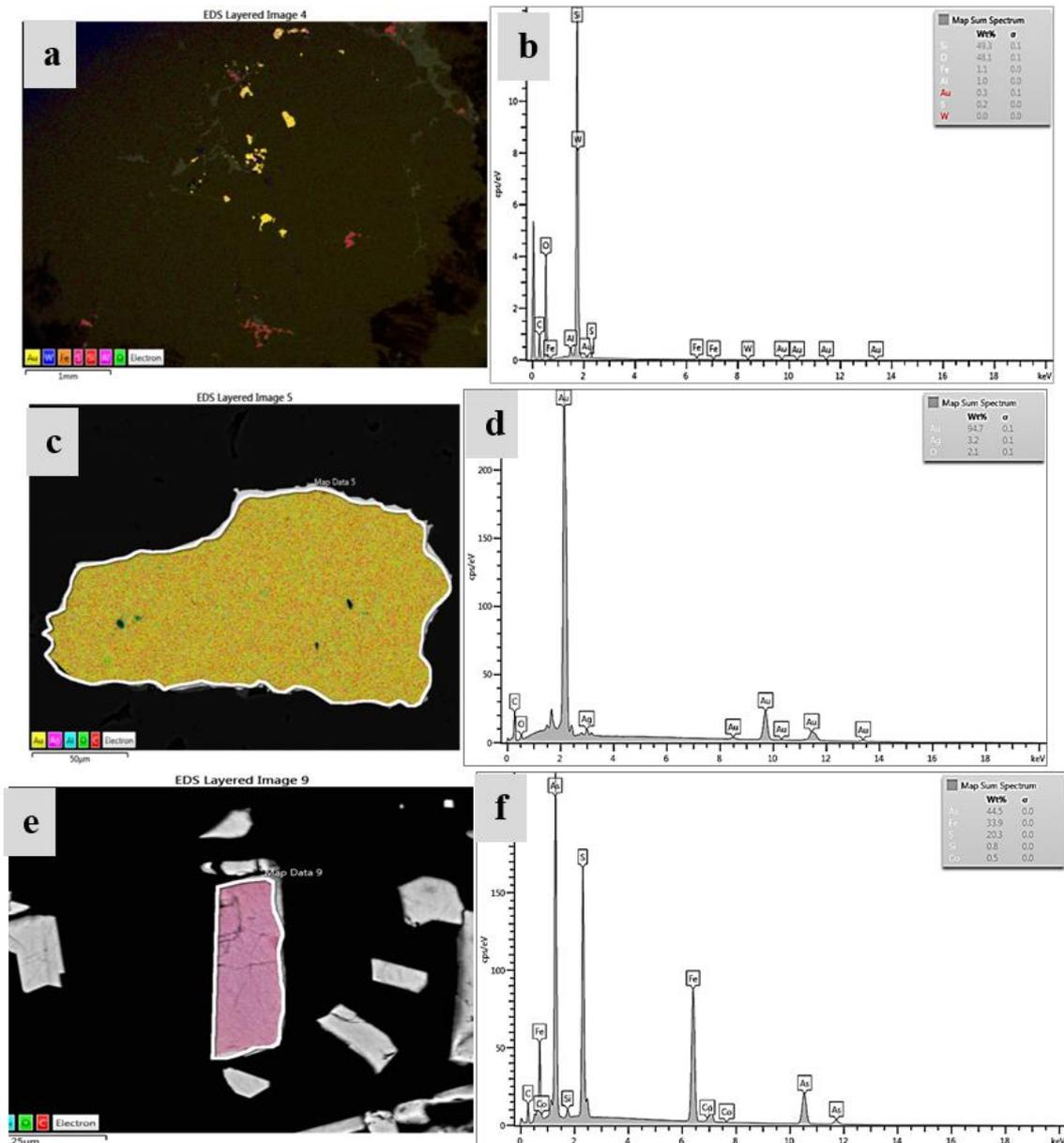
“Se obtuvo la siguiente asociación mineralógica a partir del análisis de los espectros mostrados: Andalucita-Moscovita-Goethita.

5.2.2.5. Estudio por Microscopia Electrónica de Barrido(MEB)

Se realizó análisis elemental, tanto de barrido areal como puntual, para confirmar la pureza del oro, además de detectar presencia de inclusiones solidas de oro en cristales de arsenopirita”.

Figura 73

Análisis de Oro por MEB.



“**a.** Análisis areal por MEB, dentro de una veta de cuarzo asociado a sulfuros. **b.** Firmas espectrales producto del análisis areal de la veta de cuarzo, destacando la presencia de oro. **c.** Análisis areal por MEB de una partícula de oro nativo, dentro de la veta de cuarzo en estudio. **d.** Firmas espectrales obtenidas por el MEB, para un análisis areal de una partícula de oro, se observa el resultado cuantitativo, mostrando presencia de plata de un 3%. **e.** Análisis areal de un cristal de arsenopirita dentro de la veta de cuarzo. **f.** Firmas espectrales obtenidas por el MEB, mostrando resultados del análisis areal, se adjunta los resultados cuantitativos en porcentaje por cada elemento”.



5.2.3. **Muestra: LP16-IF-MC04**

“ En la zona de Balcon se observaron abundantes afloramientos de pizarras que pertenecen a la formación Ananea, fáciles de observar gracias a las labores artesanales de minería, estos presentan orientación de E a W, con buzamiento hacia el Norte, además se encuentran asociados a estructuras plegadas como anticlinales, ubicados en el margen izquierdo del rio Oscocachi. La roca presenta bitumen al tacto, con grano fino, además de encontrarse fracturados; como en los casos anteriores presenta filtraciones de agua superficial el cual causa alteración de sulfuros mostrando presencia de patinas y en fracturas rellenas por oxidos de hierro. En labores subterranas se aprecia diversas vetas de cuarzo asociado con sulfuros, presentan rumbo subparalelo a la dirección de foliación, en algunos casos la orientación va cambiando a casi perpendiculares, debido a los anticlinales.

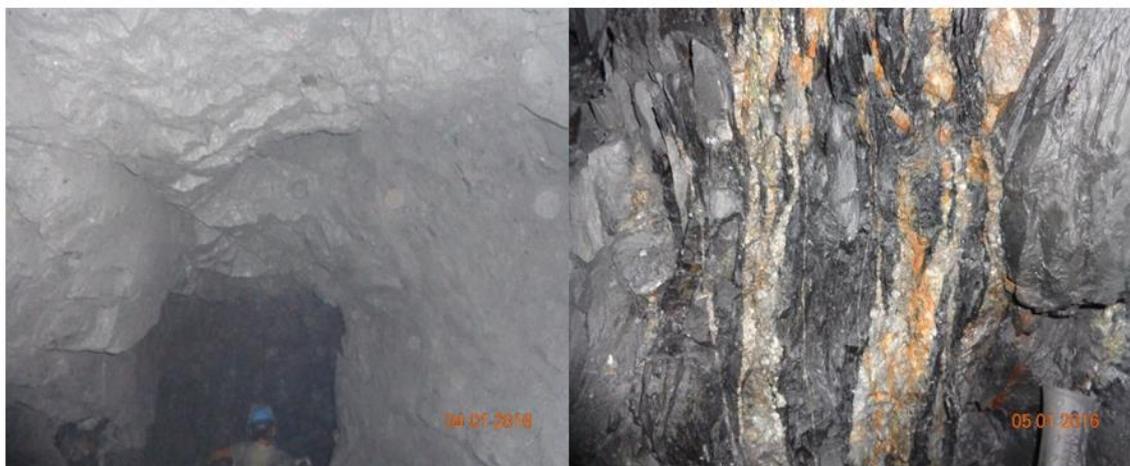
Figura 74

Afloramiento de Pizarras de la Formación Ananea, en la Zona de Balcon.



Figura 75

Punto de Muestreo en la Zona de Balcon, Formación Ananea.



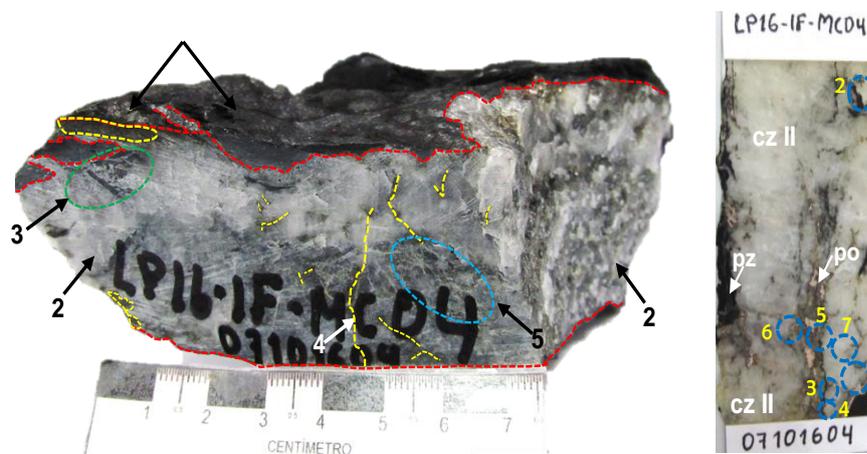
En la figura anterior se observa una galería de acceso a una labor artesanal, con orientación hacia el NW, cortando los paquetes de pizarra. Notese las venas de cuarzo con oxidación, subparalelos a la dirección de foliación de las pizarras, presenta buzamiento hacia el N.

Descripción Macroscópica

La muestra corresponde a una estructura vetiforme. **1.** Pizarra cortada por una veta de cuarzo, con agregados de sericita producto de alteración. **2.** Veta de cuarzo II-III, con espesor de 3 cm, la cual corta la roca caja. **3.** Fragmentos líticos correspondientes a la roca caja, reemplazados por la veta de cuarzo. **4.** Fracturas de la veta rellena por pirrotita-calcopirita, asociado a cloritas. **5.** Agregados de cloritas asociado a cuarzo gris.

Figura 76

Muestra de Mano y Sección Delgada Doblemente Pulida. Muestra LP16-IF-MCO04.



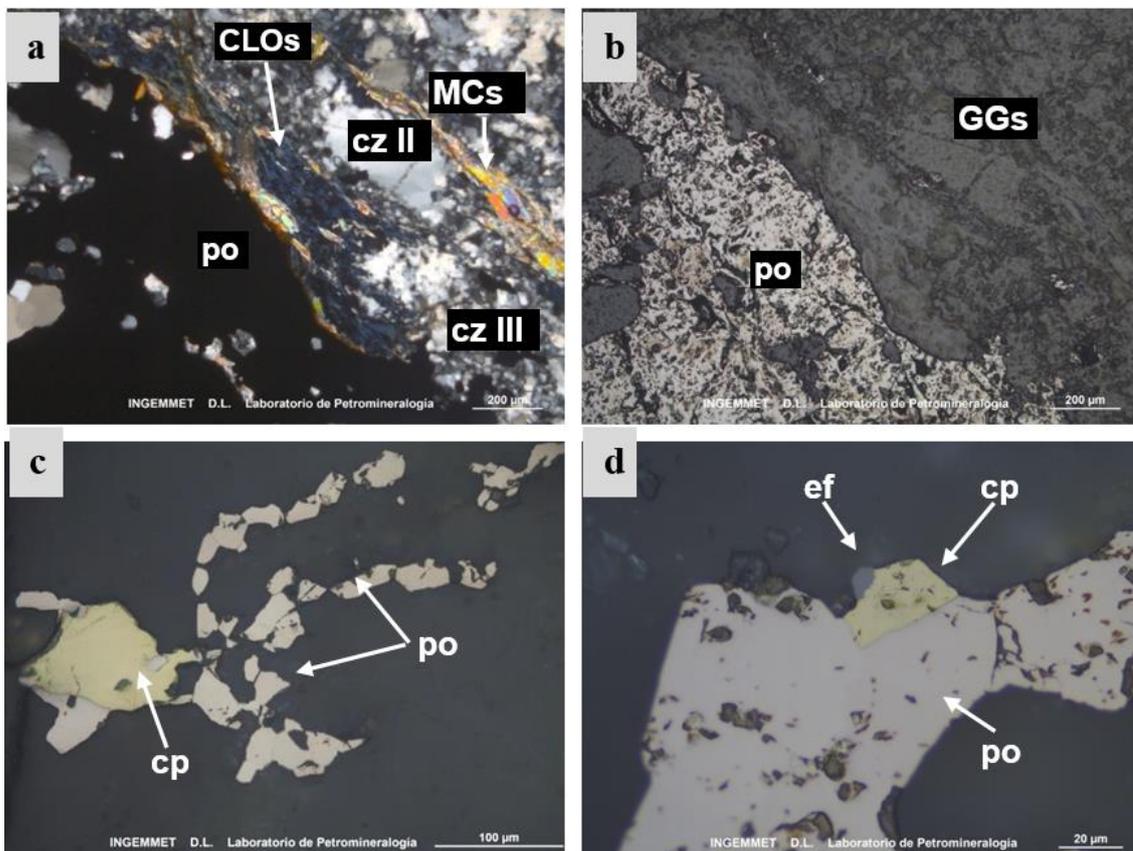
Además, se observa la sección delgada doblemente pulida, preparada a partir de la muestra de mano, donde se ha seleccionado diferentes **Campos** : 1, 2,

3, 4, 5 y 6 que corresponde a la veta de cuarzo, el cual contiene inclusiones fluidas menores a 28 μm .

5.2.3.1. Estudio Petrominerográfico

Minerales: Pirita, calcopirita y esfalerita. **Texturas:** De relleno y de reemplazamiento.

La muestra corresponde a una estructura vetiforme. Esta constituida por blastos de cuarzo asociado a cloritas y oxidos de hierro, con presencia de pirrotita y calcopirita; además se presentan fragmentos líticos ligeramente deformados y flexionadas, formando estructuras lenticulares.



Fotomicrografías N° 19: a. y b. Detalle de la estructura vetiforme, conformada por dos generaciones de cuarzo II y III:cz II-III, asociado a agregados microfibrosos de cloritas: CLOs, reemplazando y englobando relictos de fragmentos líticos: Frag.Líticos, ligeramente deformados.



c. Agregados de pirrotita:po, asociados a calcopirita: cp. d. Calcopirita reemplazado por esfalerita:cp(ef), además se encuentra como reemplazamiento de pirrotita:po.

Paragénesis

Ilmenita- Calcopirita- Pirrotita-Esfalerita

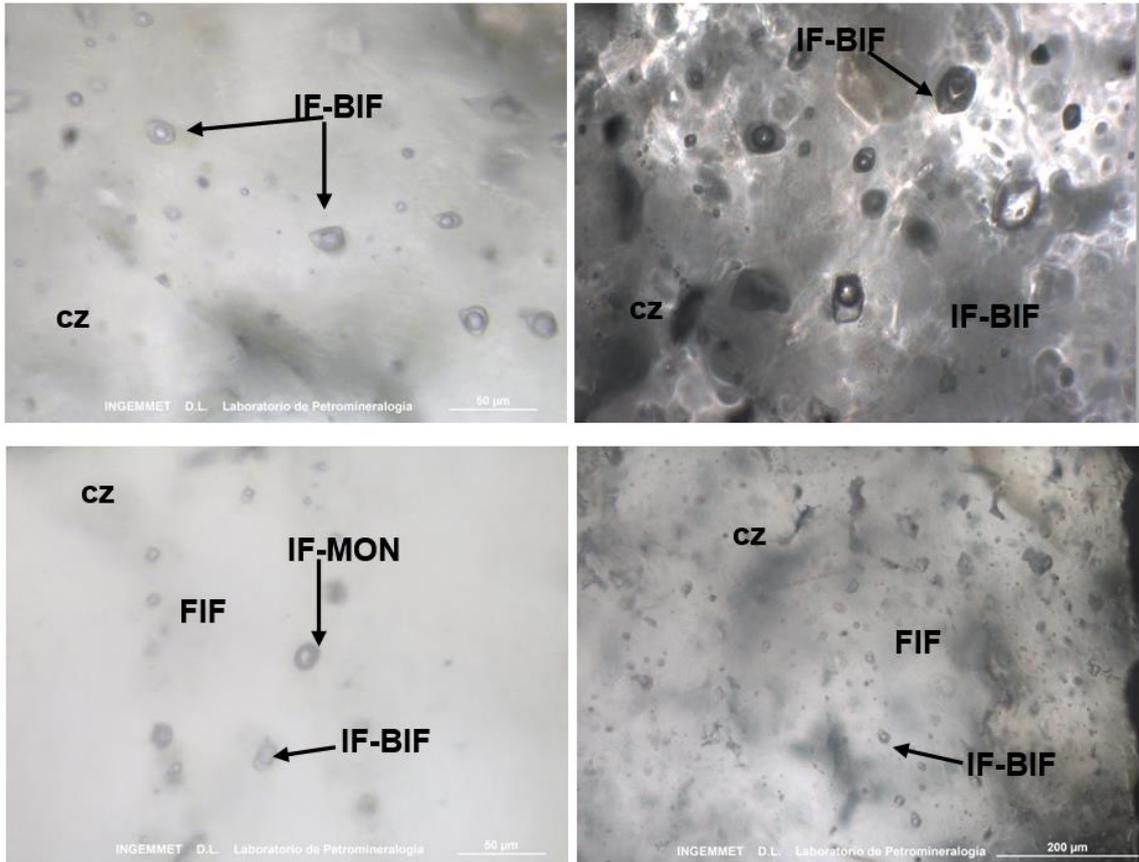
5.2.3.2. Estudio Petrográfico de Inclusiones Fluidas

El estudio de las IF se realizó en cristales de cuarzo II de la veta, donde se observaron 6 campos relacionados con la mineralización de **oro**, encontrándose IF bifásicas y monofásicas con tamaños menores a 28 μm y 15 μm respectivamente.

Tabla 27

Características Petrográficas de Inclusiones Fluidas-Muestra LP16-IF-MC03.

| Campo | Clasificación | Forma | Tipo | Relleno(%) | Tamaño(μm) |
|-------|---------------|-----------|-------|------------|-------------------------|
| 1 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.60 | ≤ 23 |
| 2 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.60 | ≤ 28 |
| | P-Monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 15 |
| 3 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.80 | ≤ 10 |
| 4 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.80 | ≤ 14 |
| 5 | P-monofásica | Regulares | Vapor | 1 | ≤ 15 |
| 6 | P-bifásica | Regulares | Vapor | 0.70 | ≤ 17 |



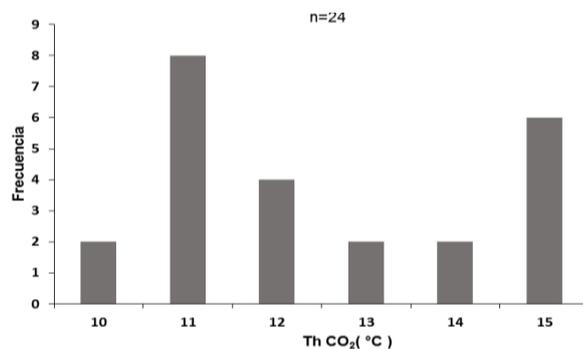
Fotomicrografías N° 20: Familia de inclusiones fluidas(FIF) primarias bifasicas(IF-BIF) y monofasicas(IF-MON), ocurren alineadas en cristales de cuarzo II.

5.2.3.3. Estudio Microtermométrico de Inclusiones Fluidas

Temperatura de homogeneización de fusión del CO₂

Figura 77

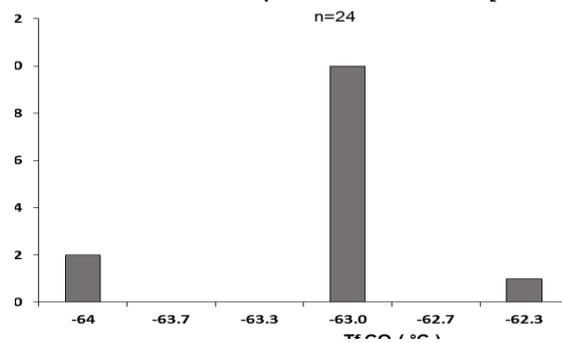
Histogramas de Fusión del CO₂.



En el histograma se observa 2 poblaciones de inclusiones fluidas, para la temperatura de homogeneización de CO₂, el primero alrededor de 11°C y el segundo en torno a 15°C.

Figura 78

Histograma de Fusión del CO₂.

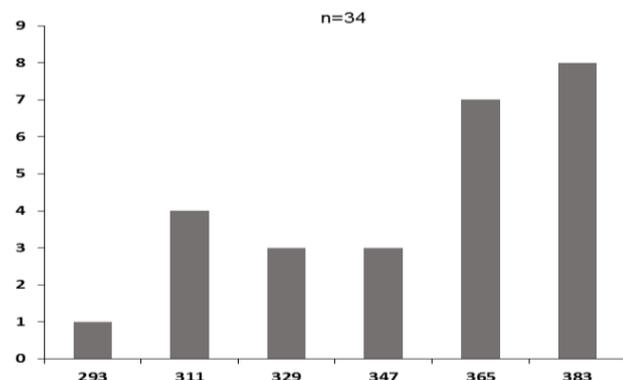


Según el histograma se observa 3 poblaciones de inclusiones fluidas, para temperaturas de fusión de CO₂, el primero alrededor de -64°C, segundo en torno a -63°C y el ultimo alrededor de -62°C

Temperatura de homogeneización total

Figura 79

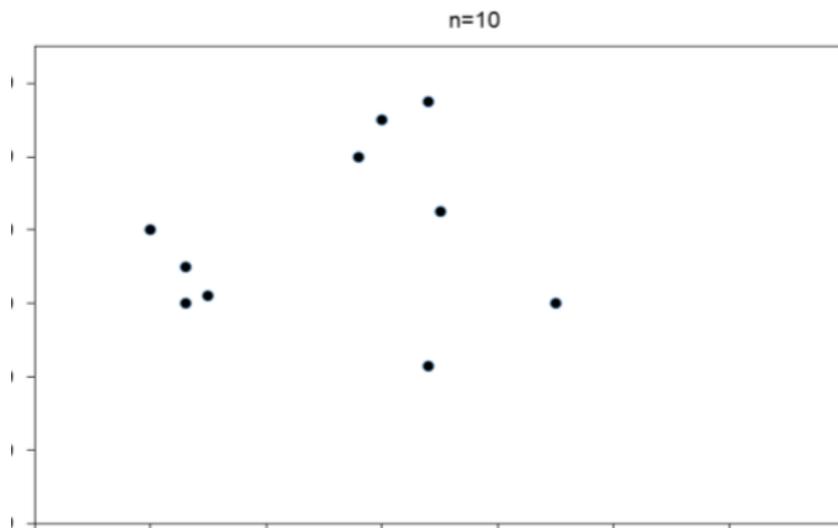
Histograma de Th Total.



Según el histograma se observa dos poblaciones de inclusiones fluidas para la temperatura de homogeneización total, el primero alrededor de 311°C y el segundo en torno a 383°C.

Figura 80

Gráfico de Dispersión de Th Total vs salinidad de la Muestra LP16-IF-MC04.



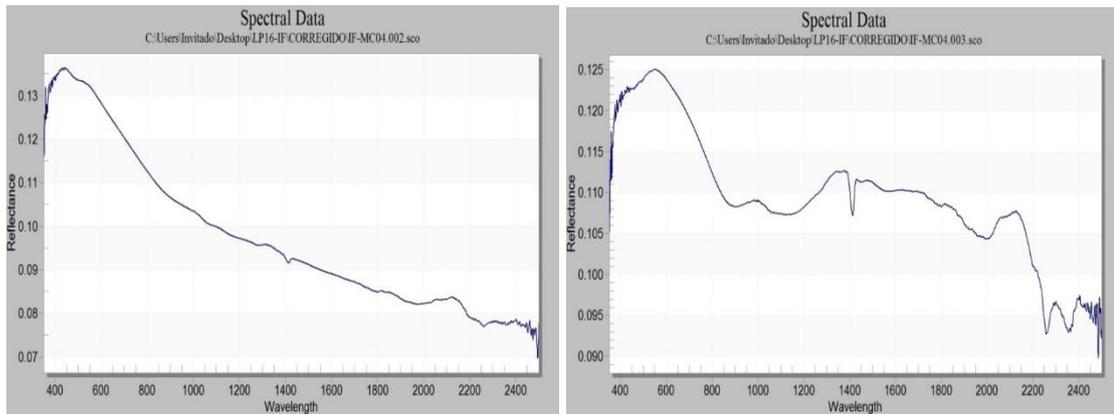
En el grafico se observa dos poblaciones de inclusiones fluidas, evidenciando mezcla de fluidos isotérmicos, con temperaturas que van en incremento desde 290°C hasta 370°C, con variación de salinidades desde 1% a 4.5%eq. peso NaCl.

5.2.3.4. Estudio de alteraciones hidrotermales

En la siguiente figura se tiene dos espectros, resultado del análisis con el equipo de TerraSpec:

Figura 81

Difractogramas de la Muestra LP16-IF-MC04.



Se obtuvo la siguiente asociación mineralógica: Andalucita-
Moscovita

5.3. CÁLCULOS MICROTHERMOMETRICOS

5.3.1. Resumen del estudio de inclusiones fluidas

Tabla 28

Resumen de las Características del Estudio de Inclusiones Fluidas.

| Muestra | N° Total IF | Clasf./ Tipo | Tf(CO ₂)°C | Th total (L-V)°C | Th parcial (CO ₂)°C | %wt. NaCl eq |
|--------------|-------------|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------|
| IF-MC01 | 33 | Prim.-V-Reg./bif. | -63° a -60° | 285° a 330° | -13° a 10° | 5 a 12 |
| IF-MC02 | 27 | Prim.-V-Reg./bif. | -67° a -61° | 310° a 400° | -35° a -0.5° | n.d. |
| IF-MC04 | 41 | Prim.-V-Reg./bif. | -64° a -62° | 300° a 380° | 7° a 15° | 1 a 4.5 |
| Total | 101 | Prim.-V-Reg./bif. | -67 a -60 | 285° a 400° | -35° a 15° | 1 a 12 |

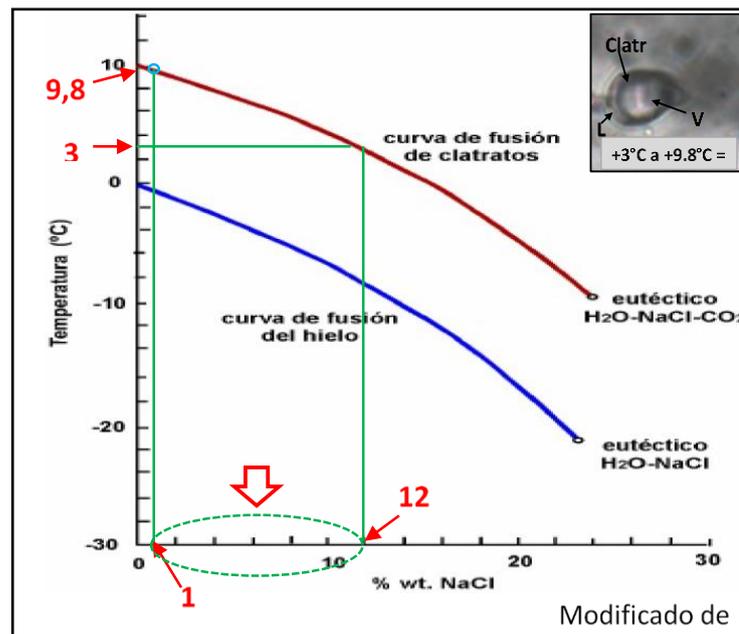
Según la tabla de resumen del estudio de IF presentan (Th: 285°C a 400°C, y salinidades de 1% a 12% eq.pesoNaCl), parametros que corresponden a la tipología de un yacimiento de tipo mesotermal y vetas de Au, con lo cual se afirma la clasificación del yacimiento como **tipo Orogénico**.

5.3.2. Salinidad

Para obtener los valores de salinidad del fluido mineralizante se ha tomado en cuenta la Tf(temperatura de fusión) de clatratos, de un total de 36 inclusiones fluidas. Ello se ha realizado mediante el ploteo de datos en el gráfico de temperaturas de fusión de clatratos en relación con la salinidad.

Figura 82

Cálculo de la Salinidad a Partir de la Temperatura de Fusión del CO₂.



De la figura se observa que los valores extremos de la temperatura de fusión de clatratos son desde 3 °C a 9.8 °C, a partir de estos se ha proyectado en

la curva de fusión de clatratos, y por ende en el eje de las abscisas donde se obtiene el respectivo valor para la **salinidad, ubicandose entre 1% a 12%eq.pesoNaCl.**

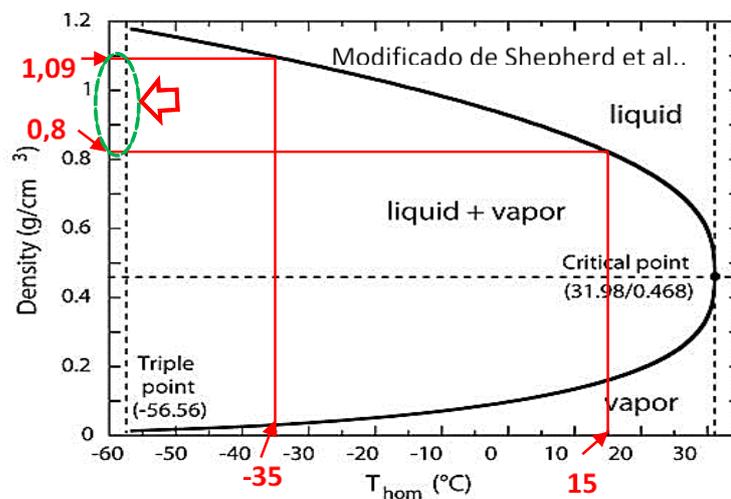
5.3.3. Densidad del fluido mineralizante

Densidad del CO₂

A través del siguiente grafico se ha determinado la densidad de las inclusiones fluidas, respecto a la presencia de CO₂.

Figura 83

Cálculo Para la Densidad de Inclusiones Fluidas con CO₂.



Densidad total de la inclusión fluida

$$\rho_{\text{CO}_2} = 0,82 \text{ a } 1,09 \text{ g/cm}^3$$

80% Vol. observado visualmente que pertenece a CO₂(L+V)

20% Vol. observado visualmente que pertenece a H₂O+NaCl(L)

$$\rho(\text{total}) = \text{vol.} * \rho + \text{vol.} * \rho$$

$$= (0.8*0.82)+(0.2*1.01)$$



$$= 0.652 + 0.202 = 0.85 \text{ g/cm}^3$$

Densidad del fluido mineralizante:

$$\rho = 0.85 \text{ a } 1.07 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo del % CO₂

$$\% \text{CO}_2 = 0.652 / 0.85 = 76\% \text{ CO}_2 \text{ (wt. en peso)}$$

Seguidamente este resultado se recalcula para hallar el porcentaje en peso a moles.

76% (wt. en peso) a moles:

$$\frac{\frac{76}{44}}{\frac{76}{44} + \frac{24}{18}} = 0.56 = 0.56 * 100 = 56\% \text{ mol de CO}_2$$

81.5% CO₂ (wt. en peso) a moles:

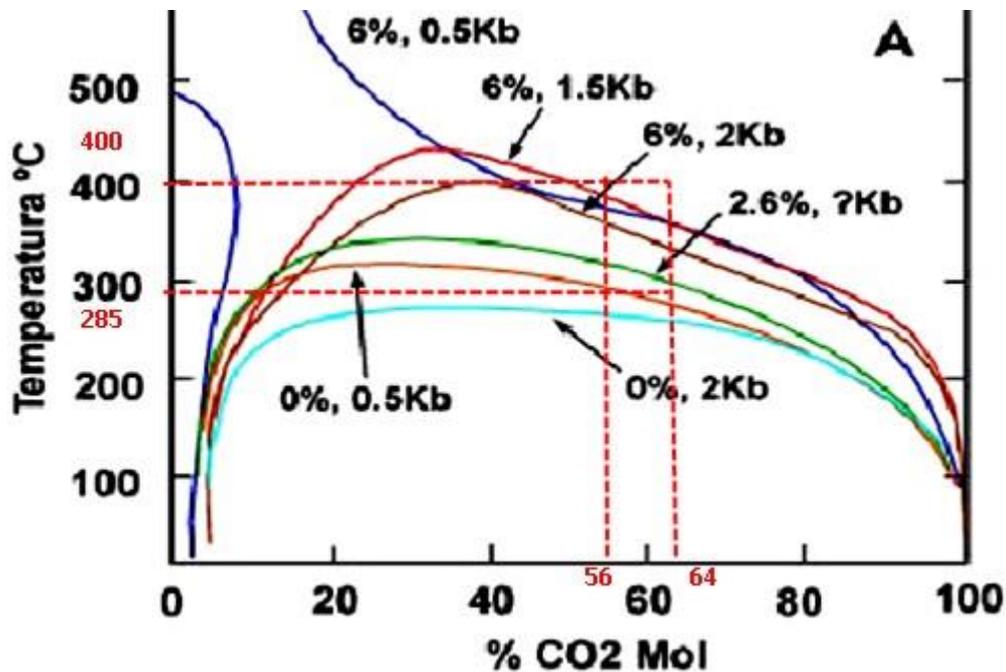
$$\frac{\frac{81.5}{44}}{\frac{81.5}{44} + \frac{18.5}{18}} = 0.64 = 0.64 * 100 = 64\% \text{ mol de CO}_2$$

Por tanto, las inclusiones fluidas analizadas en la zona de estudio, presentan contenidos aproximados de **56% a 64% en moles de CO₂**. Con estos resultados es posible plotear en el grafico 93 para determinar la presión mínima de atrapamiento para las inclusiones fluidas y por ende del fluido mineralizante.

5.3.4. Presión de atrapamiento de las inclusiones fluidas

Figura 84

Cálculo de la Presión de Atrapamiento de las Inclusiones Fluidas.



Según el gráfico se observa que la presión mínima de atrapamiento de las inclusiones fluidas está en el rango de **500 a 1500 bares**. Además, se resalta el contenido de NaCl para un 6%, el cual hace variar las presiones del fluido acuoso-carbónico. Sin embargo, estos valores determinados para la presión son aproximados, debido, a los cambios de presión y temperaturas que pudo haberse dado durante el los procesos de metamorfismo a los cuales fue sometido la roca caja, además de los procesos tectónicos a las que estuvo sujeto las vetas de cuarzo.”

5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizado el estudio detallado para las tres muestras de inclusiones fluidas, estos son sintetizados en la Figura 96, donde se presenta la Th con relación a los

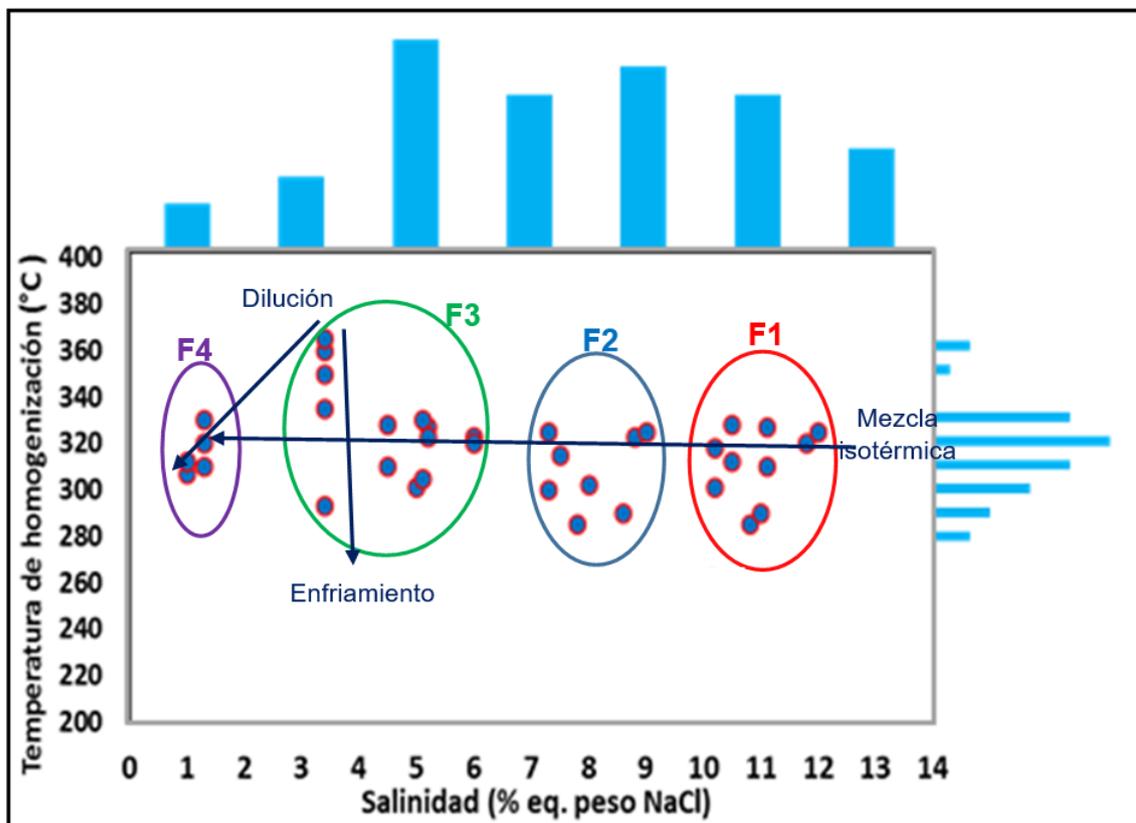
valores calculados de salinidad. Se observa la distribución de sus respectivos histogramas, para un total de 36 inclusiones fluidas analizadas a partir de las muestras LP16-IF-MC01 y Lp16-IF-MC04, cabe mencionar que el total de inclusiones analizadas fueron de 101, sin embargo, a partir de estos solo 34 fueron posibles medir sus temperaturas de fusión de clatratos, y por ende calcular las salinidades.

Es necesario mencionar que las Th total de las IFs obtenidas, corresponden a un total de 86 inclusiones, ello se muestra en el histograma de la figura 96.

5.4.1. Evolución del fluido mineralizante

Figura 85

Dispersión de Temperatura de Homogeneización Total en Relación con la Salinidad.



Fuente: Elaboración Propia



Según el gráfico se puede inferir que hubo procesos de mezcla isotérmica predominantemente, además de enfriamiento y dilución en el fluido mineralizante (F: Población de fluidos).

Se observa 4 poblaciones de IF, donde la población 1 (F1) tiene T_h de 280°C a 340°C con salinidades de 10% a 12% eq. peso NaCl; la población 2 (F2) con T_h de 280°C a 330°C con salinidades de 7% a 9% eq. Peso NaCl; la población 3 (F3) con T_h de 280°C a 360°C y salinidad de 3% a 6% eq. Peso de NaCl, y la población 4 (F4) con T_h de 300°C a 330°C y salinidad alrededor de 1% eq. Peso de NaCl.

Es preciso aclarar que en F3 se ha producido un incremento de la temperatura de homogeneización hasta 370°C, lo cual fue disminuyendo progresivamente hasta 280°C, ello probablemente fue originado por los esfuerzos tectónicos que se ocurrieron en el área de estudio, y por el incremento del grado de metamorfismo. Además a partir de la población de fluidos F3 se produjo otro proceso llamado dilución el cual se produjo como una última etapa de las inclusiones fluidas antes de ser atrapadas, en ella se habría producido adición de aguas superficiales en el fluido mineralizante, debido a ello disminuyó la salinidad del fluido tal como se muestra en F4, teniendo en cuenta que la temperatura de homogeneización no presentan cambios considerables, probablemente estabilizado por el grado de metamorfismo la temperatura mantiene su rango general que va desde 280°C hasta 350°C.

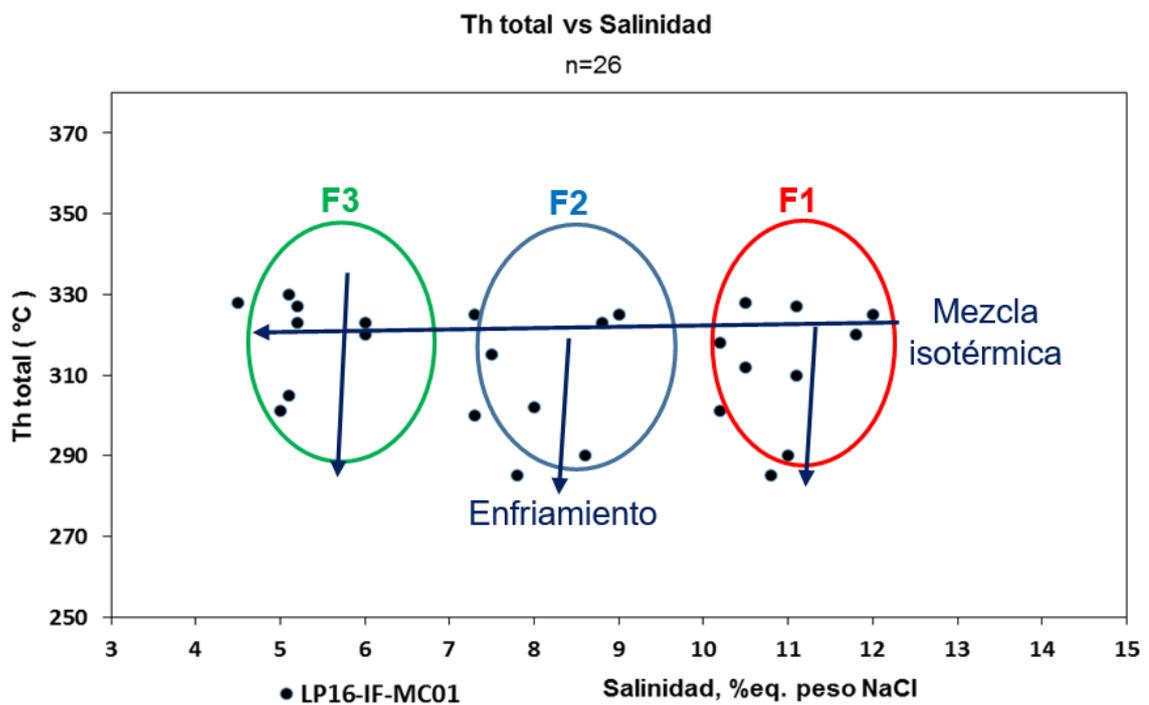
Las inclusiones fluidas analizadas están agrupadas en cuatro poblaciones con temperaturas de homogeneización alrededor de 320°C y salinidades variadas

desde 1% a 12%eq.peso NaCl. La disminución de la salinidad se ha producido probablemente a la mezcla de fluido mineralizante con aguas superficiales.

A continuación, se hace un análisis e interpretación de inclusiones fluidas tomadas a partir de la zona de Minapampa y Balcon.

Figura 86

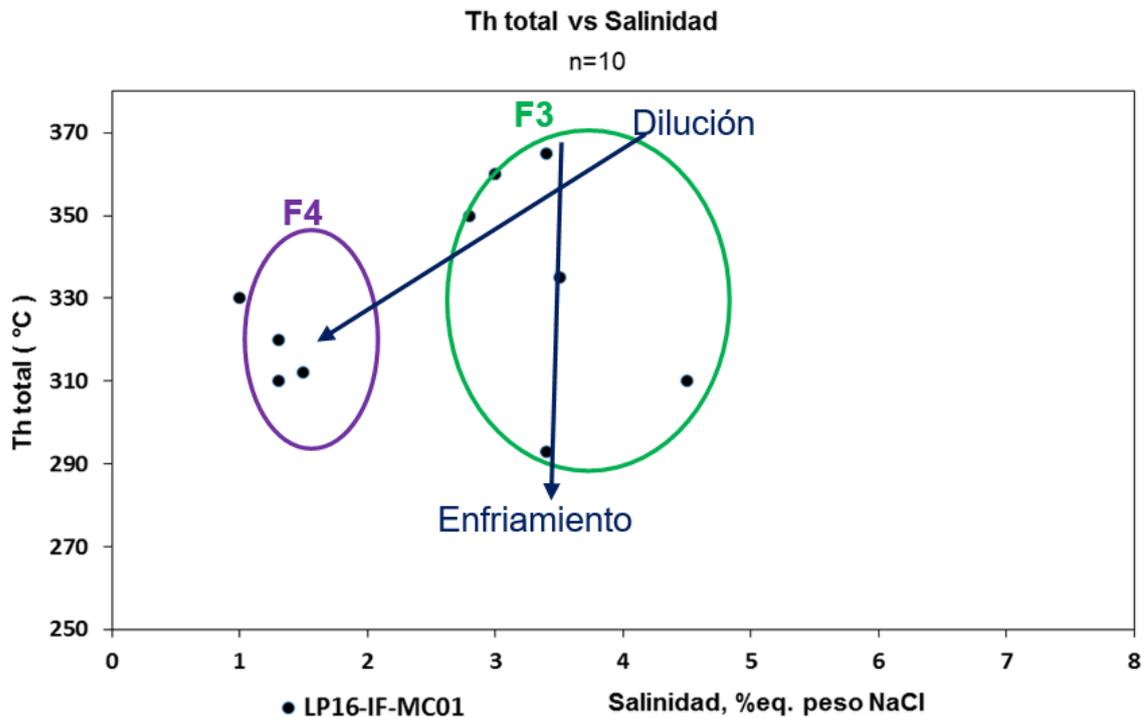
Temperatura de Homogeneización vs Salinidad en Muestra LP16-IF-MC01.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 87

Temperatura de Homogeneización vs Salinidad en Muestra LP16-IF-MC04.



Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la muestra LP16-IF-MC01 y LP16-IF-MC04, de la zona de Minapampa y Balcon, se observa que presentan cuatro familias de inclusiones fluidas (F), a partir del sistema de vetas con orientación SW a NE, que afloran en la zona de estudio, cabe mencionar que ambas muestras fueron tomadas en galerías de minería artesanal a una profundidad de 50 metros aproximadamente. Presentan temperaturas de homogeneización de 280°C a 370°C y salinidades menores a 12% eq.peso NaCl, lo que es típico de vetas de tipo mesotermal, pertenecientes a yacimientos Orogénicos. En la zona de Minapampa las inclusiones fluidas presentan temperaturas de homogeneización desde 280°C a 330°C con salinidades que varían de 12% a 4%eq. Peso NaCl, los cuales corresponde a procesos de mezcla isotérmica y enfriamiento que se mantiene constante, que no modifica considerablemente el sistema, debido a que siempre se



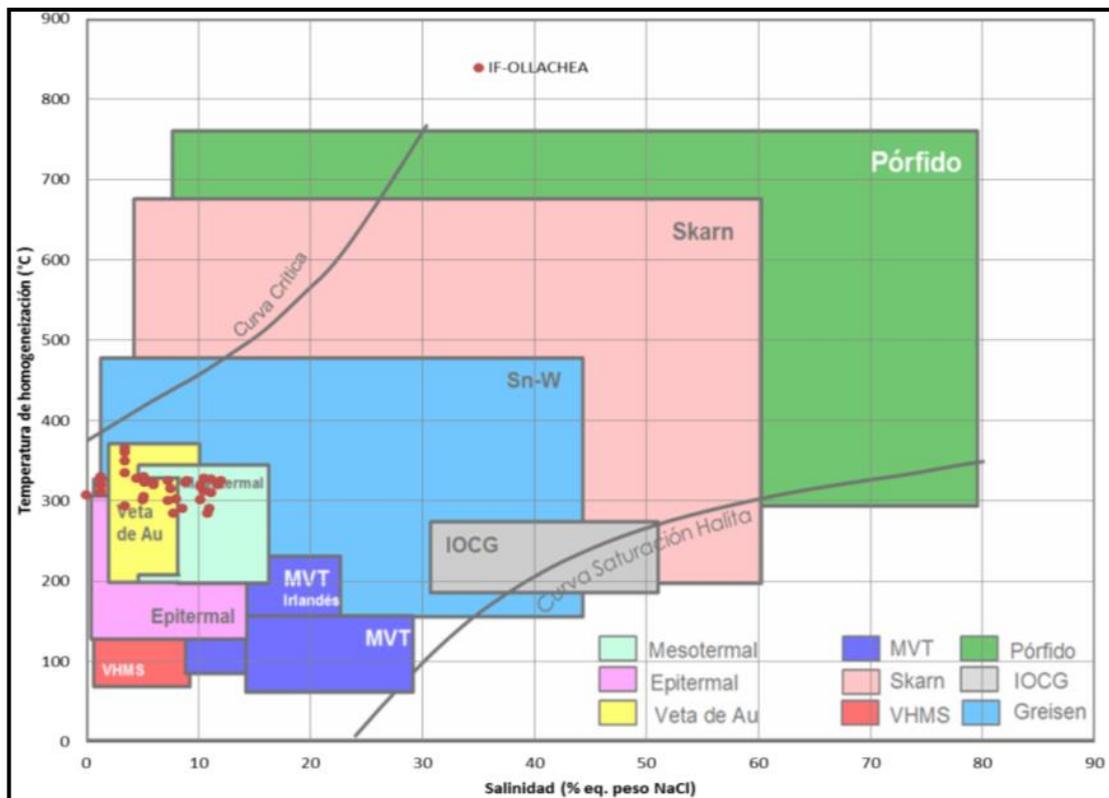
fue recuperando la temperatura promedio a 300°C, producto del constante progreso de metamorfismo. Además, se observa la ausencia de la población 4 (F4) de baja salinidad (ver figura 86), lo que podría indicar un significativo grado de erosión o levantamiento, producido por plegamientos presentes en el depósito minero de Ollachea.

En el sector de Balcón se observa dos familias de inclusiones fluidas F3 y F4, a partir del sistema de vetas con orientación NE a SW, con buzamientos casi verticales hacia el N, los cuales presentan temperaturas de homogeneización de 290°C a 370°C y la salinidad de 4.5% a 1% eq. Peso NaCl, se puede sugerir que indican procesos de dilución y enfriamiento del sistema. Además, no se presentan las familias F1 y F2, lo que podría indicar una mayor erosión producido por el río Oscocachi o levantamientos ocasionados por los plegamientos presentes en la zona de Balcón, en comparación de la zona de Minapampa.

5.4.2. Tipología del yacimiento aurífero de Ollachea

Figura 88

Ploteo de Datos de Inclusiones Fluidas Para el Yacimiento de Ollachea, en el Diagrama de Wilkinson (2001).



Fuente: Elaboración Propia.

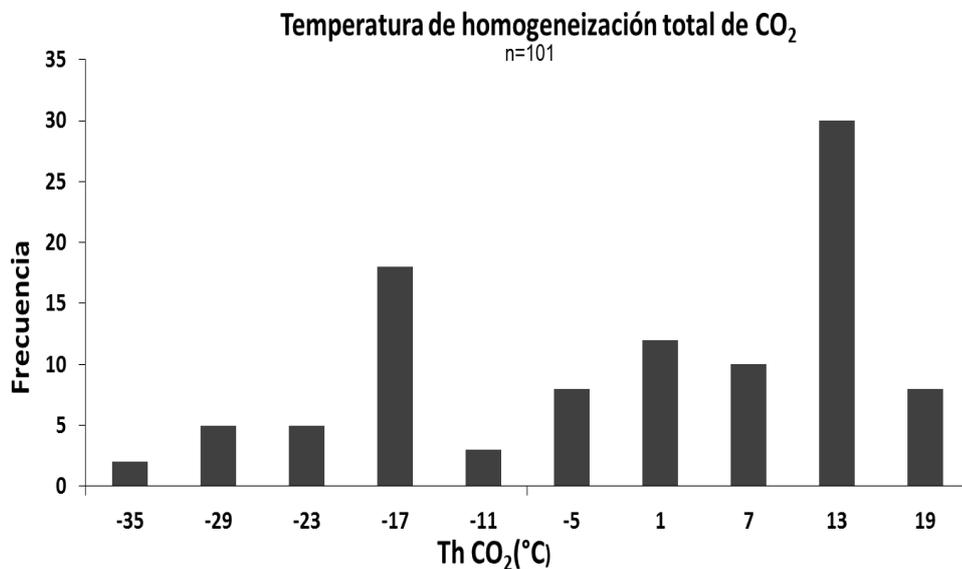
Según la figura 99 se puede observar que las IFs del depósito mineral de Ollachea corresponden a aportes mesotermales y vetas de oro. Lo cual es consistente con yacimientos orogénicos, estos presentan mineralización en torno a vetas de oro. De igual forma estos yacimientos con anterioridad fueron llamados como mesotermales, sin embargo, en la actualidad son denominados como Orogénicos.

5.4.3. Análisis de inclusiones fluidas de CO₂

El yacimiento presenta abundantes inclusiones fluidas, pertenecientes al sistema CO₂-H₂O-NaCl, adicional a estos componentes se presume la presencia de otros componentes. Para ello se plantea el siguiente análisis (ver figura 102) con fines de determinar la pureza del CO₂ en las inclusiones fluidas. Lo cual se ha estimado a partir de la Th parcial del CO₂ y Tf del CO₂. Para este análisis se tomaron en cuenta un total de 101 inclusiones fluidas.

Figura 89

Histograma de Th Total Para el CO₂.

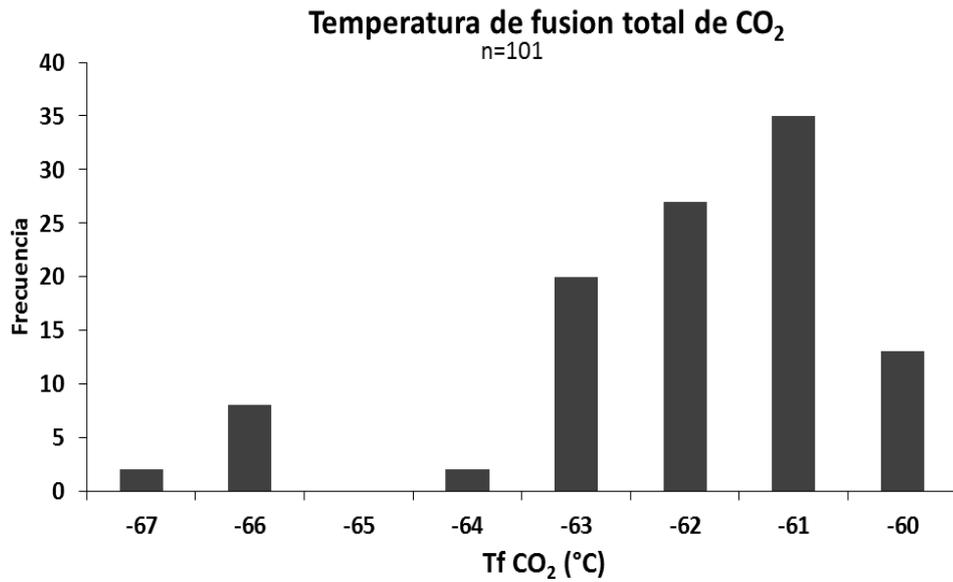


Fuente: Elaboración Propia.

Histograma de temperatura de homogeneización parcial del CO₂, donde se presentan dos poblaciones, el primero, alrededor de -17°C y el segundo en torno a 13°C., teniendo en cuenta la temperatura crítica teórica del CO₂ en 31.1°C.

Figura 90

Histograma de Temperatura de Fusión del CO₂.

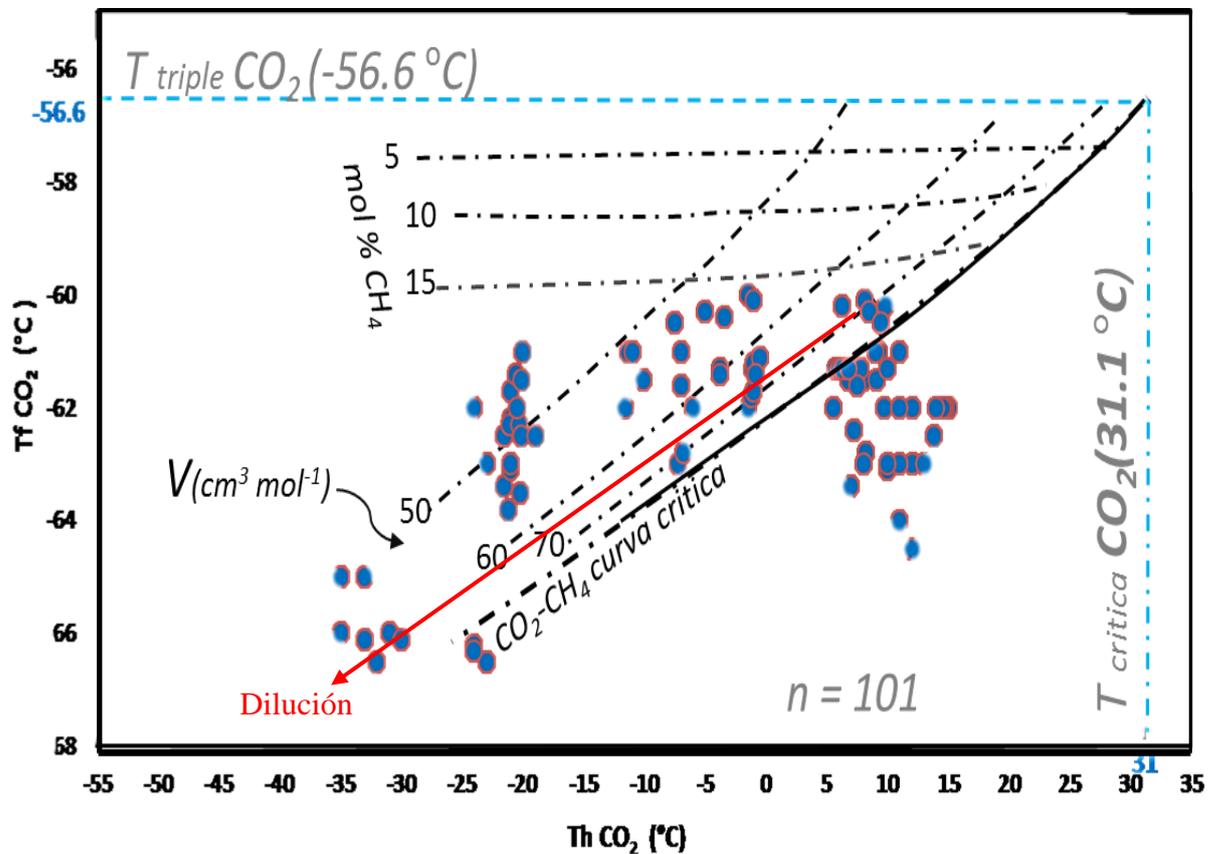


Fuente: Elaboración Propia.

En la figura se observa dos poblaciones, el primero alrededor de -66°C y el segundo en torno a -61°C , teniendo en cuenta que la temperatura del punto triple del CO₂ teórico es de -56.6°C .

Figura 91

Cálculo del Porcentaje de CO₂ y CH₄, Según la Temperatura de Fusión vs Homogeneización del CO₂.



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 91 se observa hasta cuatro poblaciones de inclusiones fluidas; todas ellas se observan que presentan proceso de dilución, lo cual podría indicar la adición de componentes distintos al CO₂, además que la roca caja presenten proporciones significativas de materia orgánica, con lo cual se habría formado metano (CH₄). Partiendo de la intersección de la temperatura crítica y el punto triple del CO₂, con valores 31.1°C y -56.6°C respectivamente, se observa que los resultados obtenidos se encuentran alejados de esta intersección, lo cual podría indicar que las inclusiones fluidas no son puras en CO₂, pues podrían contener otros componentes como el metano(CH₄), en proporciones que fácilmente superan



el 15% en moles de CH_4 según se observa en el gráfico. En síntesis, las inclusiones fluidas no son puros en CO_2 , debido a que los valores hallados para la Th y fusión del CO_2 , no concuerda con los valores teóricos.

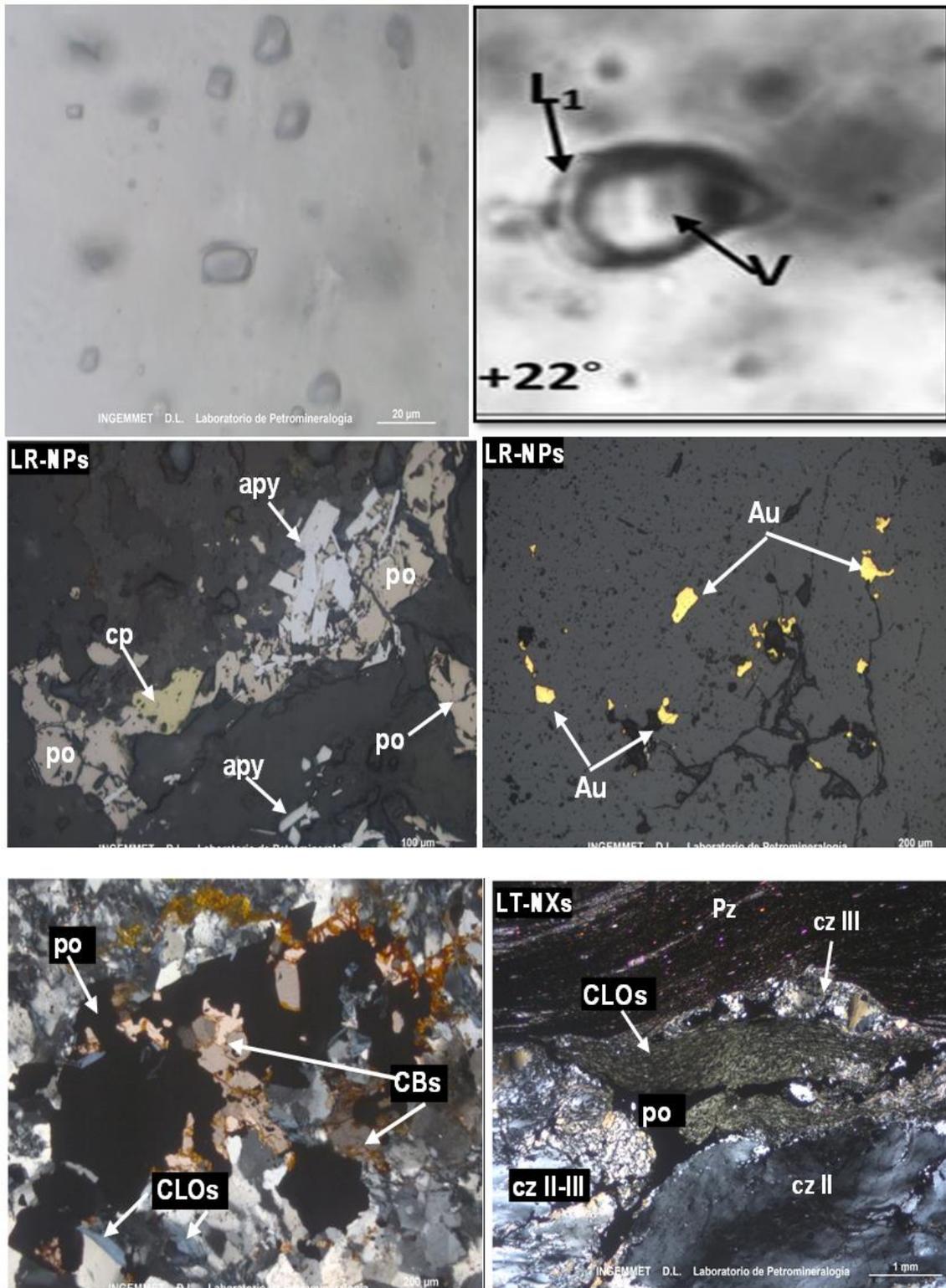
5.4.4. **Relación entre las inclusiones fluidas y la mineralización de oro**

Las inclusiones de fluidos encontradas a partir del presente estudio son de tipo bifásicas, con fase acuosas y una fase vapor de CO_2 de hasta 50%, estas características se presenta en la mayoría de las inclusiones; sin embargo, existen inclusiones ricas en CO_2 en proporciones de hasta un 80%, estos se encuentran asociadas a mineralización de oro dentro de las vetas de cuarzo, además de encontrarse relacionados a cristales de arsenopirita y pirrotita. Lo anterior se puede explicar por el rol muy importante que cumple el CO_2 en el fluido mineralizante, actuar como agente neutralizador del PH del fluido, durante el transporte tal como lo afirma Phillips (2004) y entre otros. Lo cual podría correlacionarse perfectamente con la débil alteración que sufrió la roca caja, pues la acides del fluido seguramente fue mínima, prueba de ello se observa débil alteración en la formación Sandia y Ananea que albergan las vetas de cuarzo con oro.

Así mismo se observa alteración por carbonatos en algunas zonas de la roca caja, lo que reafirmaría el ambiente casi neutro del fluido mineralizante. En la figura 103 se observa mecanismos o condiciones de solubilidad alta o baja del oro, además de ello el grafico muestra la relación entre la fugacidad de oxígeno y el ph, donde se presentan dos zonas muy importantes, diferenciados por el tipo de complejos que transportaron el oro, en la parte superior por encima de -30 en el eje de fugacidad de oxígeno y con ph ácido se presentan la zona de los complejos



clorurados; lo cual no concierne al presente estudio, debido a que las características obtenidas en el estudio petrográfico de inclusiones presentan altos contenido de CO_2 lo cual ayuda a identificar una zona con PH casi neutro, debido al agente neutralizador el CO_2 , además la abundante presencia de pirrotita nos ayudan a delimitar un área con altos contenidos de solubilidad del oro hasta 100ppb, además fue delimitada para el tipo de fluido mineralizante, permite identificar los complejos sulfurados como los que transportaron el oro, con altas solubilidades; en tal sentido el fluido mineralizante se encuentra en un ambiente reductor. Esta afirmación es corroborada por la decrepitación de las inclusiones fluidas por encima de 300°C , lo cual reafirma que las IF tienen alto contenido de CO_2 asociados con mineralización de oro. Lo anterior es consistente con los estudios de minerografía, pues estos reportan la presencia de oro nativo en las vetas de la muestra LP16-IF-MC01 y LP16-IF-MC02.



Fotomicrografía N° 21: Inclusiones fluidas, alteraciones hidrotermales y ensamble mineralógico asociado a la mineralización de oro nativo.

Además de la mineralogía asociada a la presencia de oro, se puede relacionar el contenido de CH_4 con la mineralización de oro, debido que habría provocado la reducción de la fugacidad del oxígeno y por tanto desestabilizaría

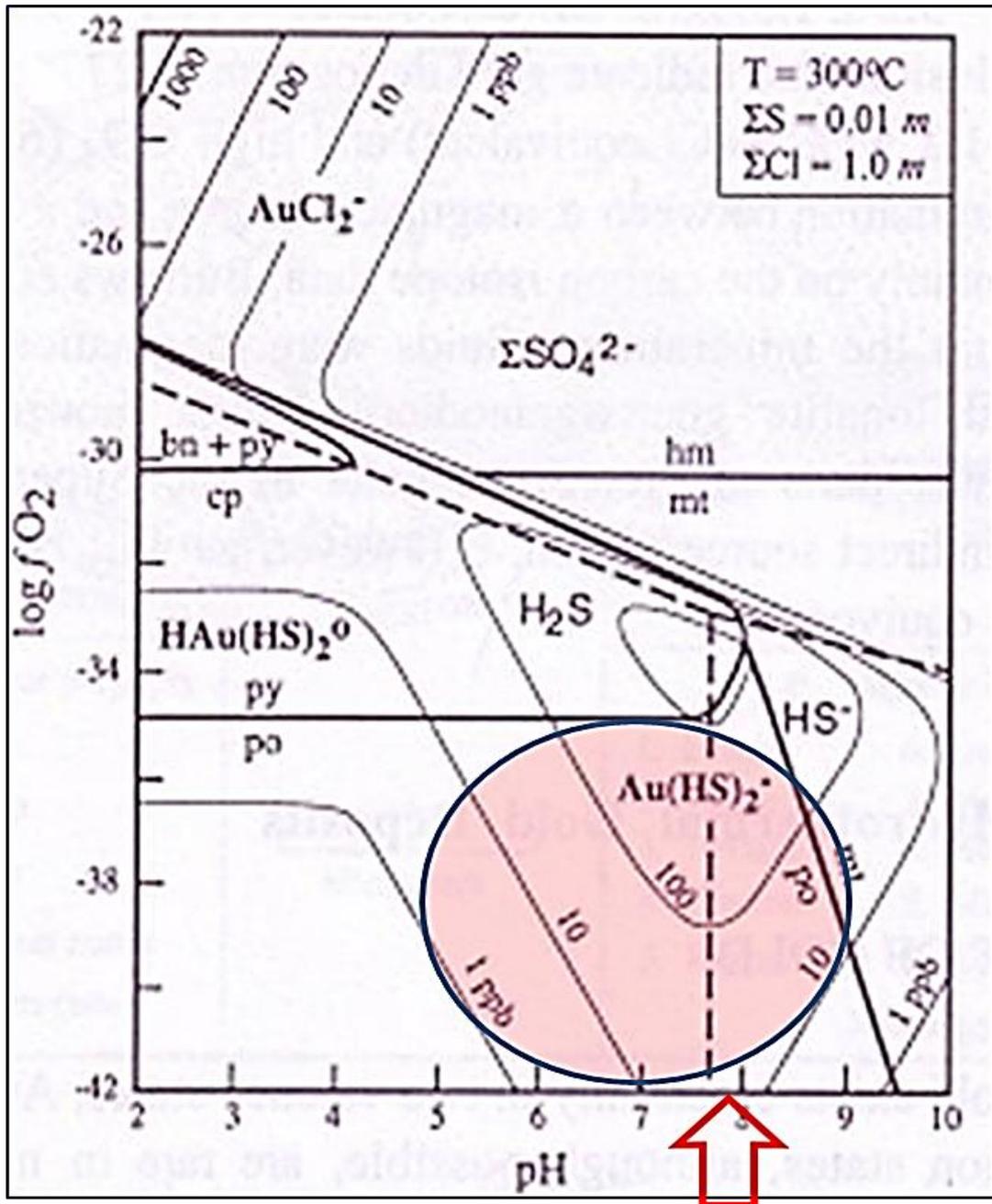


los complejos de oro, induciendo a la precipitación de oro, así lo confirma (Cox et al. 1991). La presencia de CH_4 es confirmado por la figura 102.

Por tanto, la presencia de pirrotita, arsenopirita y el cuarzo, están relacionados con la mineralización de oro, además de ello las inclusiones fluidas ricas en CO_2 y la presencia de CH_4 , permiten crear como un nuevo indicio para identificar vetas de cuarzo con potenciales de oro, ello podría ser ampliamente utilizado y aplicado en la exploración o durante el desarrollo de la mina, para ampliar zonas con potencial de oro. Inclusive durante la experimentación, las inclusiones fluidas de alto contenido de CO_2 , al aumentar la temperatura hasta llegar a 350°C se produce la decrepitación, lo cual se puede realizar en trabajos de mina para discriminar zonas con potencial, mediante la exposición de las vetas de cuarzo a llamas de fuego con lo cual suelen explotar o fracturarse, y estos serían usados para identificar vetas con presencia de oro.

Figura 92

Solubilidad y Transporte del oro.



Fuente: De Hayashi & Ohmoto, 1991.



VI. CONCLUSIONES

A través del análisis petromineralógico, se ha determinado que el depósito de Ollachea se encuentra alojado en pizarras pertenecientes a la Formación Ananea. En este contexto geológico, se han identificado estructuras de tipo veta que albergan mineralización económica, principalmente en forma de oro nativo, asociado con cuarzo, pirrotita, calcopirita, pirita, arsenopirita y, en menor medida, esfalerita.

De acuerdo con el estudio de inclusiones fluidas y microtermometría, se ha establecido que las inclusiones fluidas atrapadas en el cuarzo de las estructuras mineralizadas son de tipo bifásico y ricas en CO₂, con salinidades que oscilan entre el 1% y el 12% en peso de NaCl, y temperaturas mínimas de atrapamiento que varían entre 285°C y 400°C. Estos hallazgos indican la naturaleza orogénica del yacimiento.

El análisis petrográfico revela que la alteración producida por el fluido mineralizante en las pizarras, como roca matriz, es de intensidad débil, caracterizada por una silicificación, cloritización, sericitización, oxidación y carbonatación poco pronunciadas, atribuibles a un fluido con pH básico neutralizado por el CO₂.

La mineralización aurífera presente en las estructuras mineralizadas de Ollachea está estrechamente relacionada con inclusiones fluidas ricas en CO₂, pertenecientes al sistema CO₂-H₂O-NaCl+-CH₄, atrapadas a presiones que van de 500 a 1500 bares y densidades de 0.85 a 1.07 g/cm³. Estos hallazgos sugieren que esta relación puede servir como una herramienta de exploración para identificar estructuras potencialmente auríferas en un contexto orogénico.



VII. RECOMENDACIONES

Llevar a cabo análisis geoquímicos de las vetas mineralizadas presentes en el depósito de Ollachea, con el objetivo de establecer correlaciones con los datos obtenidos de las inclusiones fluidas.

Realizar estudios de análisis de isótopos con el propósito de obtener información adicional que permita explicar la procedencia del fluido mineralizante y sus implicaciones en el proceso de mineralización del oro en el yacimiento.

Realizar comparaciones y estudios comparativos sobre inclusiones fluidas en diferentes yacimientos de oro de tipo orogénico, con el fin de identificar patrones y variables de mineralización que puedan ser útiles en la exploración de yacimientos similares en la cordillera oriental del Perú.

Realizar investigaciones sobre las posibles implicaciones de la presencia de intrusivos en el área de estudio en relación con la génesis del yacimiento aurífero de Ollachea, con el objetivo de comprender mejor los procesos geológicos involucrados en la formación del depósito.



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., Heo, C., Valencia, M., Ryoo, C., Santisteban, A., Yang, S. & Rivera, R. (2012). Características Isotópicas y Fuentes de Mineralización de las Franjas Metalogénicas del Sureste Peruano. *Resúmenes del XVI Congreso Geológico Peruano*.
- Acosta, J. (2007). Las Inclusiones Fluidas como Guías de Exploración en Depósitos de Minerales. Ejemplo: El Pórfido de Cobre Lara Ayacucho – Perú. *Tesis De Maestría, Universidad Politécnica de Madrid*. 97 p.
- Bonnemaison, M., Fornari, M., Galloso, A., Herail, G., Jungbluth, R., Laubacher, G., Zegarra, J. (1983). Oro Primario y Oro Detrítico en la Cordillera Oriental del Perú. El Papel de la Geomorfogénesis en la Formación de Placeres. *ORSTOM e INGEMMET: Reporte final, segunda parte, Lima* 94p.
- Chávez, A., Salas, G., Gutiérrez, E. y Cuadros, J. (1997). Geología de los Cuadrángulos de Corani y Ayapata, Hojas: 28-u y 28-v. *INGEMMET, Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, n.90, 128p*.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L. Cueva, E. (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*. Boletín, n. 103, pp. 1-89.
- Chamberlain, C. & McIver, D. (2011). Ollachea Orogenic gold deposit, Peru: Discovery and advancement. Minera IRL Ltd. *Presentado en la Convención Minera PDAC 2010-Toronto, Canadá*.
- Gonzales, R., Soto, M., Carnero, E., Calcina M. y Aquino, A. (2012) Caracterización Estructural y Deformacional en los Mantos Auríferos de Llactapata, Huancasaya y



- San Miguel, Distrito de Untuca; Departamento de Puno - Sur del Perú. *Congreso de Geología*. Lima-Peru.
- Luque, D. (2013). Tesis: Geología Económica del Proyecto Ollachea. Carabaya-Puno. UNA-Puno. 127p.
- Ortega, L. (1993). Caracterización de los procesos hidrotermales en las Mineralizaciones de antimonio de mari rosa y el juncalon (zona centro ibérica meridional). Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas por la Universidad Complutense de Madrid. p.384.
- Pérez-Puig, C.R.,Castroviejo, R., Martin, D.A., Costafreda, J.L. (2011). Geotermometría, cocientes metálicos y direcciones de flujo en la veta esperanza, distrito huachocolpa (Perú). *Memorias de las II Jornadas de*.
- Roedder, E. (1984). *Fluid Inclusions*. Whashington, U.S.A.: Mineralogical Society.
- Starling, T. (2013). Structural Review of the Ollachea District, Puno, Perú. Field Report 2012. Telluris Consulting Company Internal Technical Report.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. y Alderton, D.H.M. (1985). *A practical guide to fluid inclusion studies*. New York: U.S.A.: Chapman & Hall.
- Tumialán, P. H. (2003). Compendio de Yacimientos Minerales del Perú. *INGEMMET. Boletin. Serie B: Geología Económica*, n.10, 619p.
- Velasco, F. (2004). Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. *Curso latinoamericano de metalogenia UNESCO-SEG 2004 CRICYT, Mendoza, Argentina del 17 al 28 de agosto*. 98 p.



- Valencia, M., Acosta, J. y Rivera, R. (2013). Nuevos alcances sobre la mineralización de Au-Sn-U en la Cordillera Oriental del Sureste Peruano. *Resúmenes de la 31 convención minera-PERUMIN. Arequipa, 16 al 20 de setiembre.*
- Valencia, M., Rivera, R., Paico, D. y Villarreal, E. (2011). Mineralización y geoquímica de los depósitos de la Cordillera oriental del sureste peruano. En: Minería. Instituto de Minas del Perú.
- Vilca, A. (2012). Tesis: Comportamiento estructural de la formación Ananea en la zona del proyecto Ollachea. Carabaya-Puno. UNA-Puno.
- Valdivieso, Y., Llacza, D., Vilca, A. y Rojas, J.D (2013). Geología del Yacimiento de Oro Orogénico Ollachea. *Informe Interno de Compañía Minera Kuri Kullu S.A.*
- Valencia M. & Villarreal E. (2009). Geología económica y metalogenia del Perú. *Proyecto GE-13. INGEMMET, Lima - Perú.*
- Wilkinson, J.J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, 229-272.
- Yparraguirre Calderón, J.A. (2008). Secuencias paragenéticas, alteraciones hidrotermales e inclusiones fluidas de la Veta Rublo, Mina Chonta, Huachocolpa. 2008. Tesis MSc; Red.



IX. WEBGRAFIAS

- Bottrell, S.H., Shepherd, T. J., Yardley, B. W.D. y Dubessy, J. (1988). A fluid inclusion model for the genesis of the ores of the Dolgellau Gold Belt, North Wales. *Journal of the Geological Society*, 145(1), 139-145. doi: 10.1144/gsjgs.145.1.0139
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. y Steele-MacInnis, M. (2014). Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. *Treatise on Geochemistry 2nd Edition*, 13(2), 119-142. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0
- Bodnar, R. J., Reynolds, T. J., Kuehn, C. A. (1985). Fluid-Inclusion Systematics in Epithermal Systems. *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*, B. R. Berger, P. M. Bethke. Doi: doi.org/10.5382/Rev.02.05
- Bodnar, R.J. (2003a). Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation Re-equilibration of fluid inclusions. *Mineral. Assoc. Canada, Short Course 32*, 213-230. Recuperad de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.2092&rep=rep1&type=pdf>
- Collins, P.L.F. (1979). Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, 74 (6), 1435-1444. Doi: 10.2113/gsecongeo.74.6.1435
- Camprubí, A. y Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México-Actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81. Doi: 10.18268/BSGM2006v58n1a2
- Cheilletz, A., Clark, A. H., Farrar, E., Arroyo, G., Pichavant, M. y Sandeman, H. A. (1992). Volcano-stratigraphy and ⁴⁰Ar/ ³⁹Ar geochronology of the Macusani ignimbrite field: monitor of the Miocene geodynamic evolution of the Andes of



southeast Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 205(1-3), 307-327. doi:
10.1016/0040-1951(92)90433-7

Camprubí, A. (2008). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 25-42. doi: 10.18268/BSGM2010v62n1a2

Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 25-42. doi: 10.18268/BSGM2010v62n1a2.

Castroviejo, R., Yparraguirre, J.A. y Chacón, E. (2007). Lithochemistry and fluid flow in the epithermal Veta Rublo base metal-silver deposit, Chonta Mine (Huancavelica, Perú). *23rd International Applied Geochemistry Symposium (IAGS)*. Universidad de Oviedo. pp. 159-160. Recuperado de <http://oa.upm.es/10967/>

Dubois, M. (1992) Thèse 3ème cycle, I.N.P.L., Nancy (France), 228 p. <http://www.theses.fr/1992INPL125N>

Goldstein, R.H. y Samson, I. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*, 32, 9-53. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Robert_Goldstein5/publication/270218809_Petrographic_analysis_of_fluid_inclusions/links/54a31fe50cf257a63604decc/Petrographic-analysis-of-fluid-inclusions.pdf

Goldstein, R.H. (2003). Petrographic Analysis of Fluid Inclusions. *Mineralogical Association of Canada*, p.43. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/270218809_Petrographic_analysis_of_fluid_inclusions



- Goldfarb, R.J., Groves, D.I. y Gardoll. (2001). Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18(1-2), 1-75. Doi: 10.1016/S0169-1368(01)00016-6
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Marian, M., Hagemann, S.G. y Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5), 7-27. Doi: 10.1016/S0169-1368(97)00012-7
- Goldstein, R.H. y Reynolds, T.J., (1994). *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. doi: 10.2110/scn.94.31
- Goldfarb, R.J. y Groves, D.I. (2015). Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233,2-26. Doi: 10.1016/j.lithos.2015.07.011
- Goldfard, David I. Groves (2015). Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2-26. doi: 10.1016/j.lithos.2015.07.011
- Knight, C.L. y Bdnar, R.J. (1989). Synthetic fluid inclusions: IX. Critical PVTX properties of NaCl-H₂O solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 3-8.
Recuperado de https://www.geochem.geos.vt.edu/fluids/pdf/1989_Knight_Bodnar_GCA.pdf
- Kontak, D.J., Farrar, E., Clark, A.H. y Archibald, D.A. (1990). Eocene tectono-thermal rejuvenation of an upper Paleozoic-lower Mesozoic terrane in the Cordillera de Carabaya, Puno, southeastern Peru, revealed by K-Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(4), 231-246. doi: 10.1016/0895-9811(90)90005-L



- Kontak, D. J., Cumming, G.L., Krstic, D., Clark, A. H. y Farrar, E. (1990a). Isotopic composition of lead in ore deposits of the Cordillera Oriental, southeastern Peru. *Economic Geology*, 85(7), 1584-1603. doi: 10.2113/gsecongeo.85.7.1584
- Laubacher, G. (1978). Estudio geológico de la Región Norte del Lago Titicaca. INGEMMET. Boletín. Serie D: Estudios Regionales, n. 5, 120p. Recuperado de <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/320>
- Miskovic, A., Spikings, R.A., Chew, D.M., Kosler, J., Ulianov, A., Schaltegger, U. (2009). Tectonomagmatic evolution of western Amazonia: geochemical characterization and zircon U-Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. *Geological Society of America*, 121(9-10), 1298-1324. doi: 10.1130/B26488.1
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A. y Bodnar, R. J. (2011). Mineral Textures and Fluid Inclusion Petrography of the Epithermal Ag-Au Deposits at Guanajuato, Mexico: Application to Exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 114, 20-35. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.12.001
- McBride, S.L., Clark, A. H., Farrar, E. y Archibald, D.A. (1987). Delimitation of a cryptic Eocene tectonothermal domain in the eastern Cordillera of the Bolivian Andes through K-Ar dating and ^{40}Ar - ^{39}Ar step-heating. *Journal of the Geological Society*, 44(2), 243-255. doi: 10.1144/gsjgs.144.2.0243
- Melgarejo, J.C., Proenza, J.A., Gali, S., Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23. doi:10.18268/BSGM2010v62n1a1



- McCuaig, T.C., Kerrich, R. (1998). P–T–t–deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, 12, 381–454. Doi: 10.1016/S0169-1368(98)80002-4
- McLaughlin, D.H. (1924). Geology and physiography of the Peruvian Cordillera, departments of Junin and Lima. *Geological Society of America Bulletin*, 35(3), 591-632. doi: 10.1130/GSAB-35-591
- Moritz, R. (2000). What have we learn about orogenic lode gold deposits over the past 20 years?. Scientific Communication. Section des Sciences de la Terre. University of Geneva, Switzerland. p. 1-7. Recuperado de https://www.unige.ch/sciences/terre/research/Groups/mineral_resources/archive/pub_archive/moritz_gold_brgm_2000.doc.
- Nash, J.T. (1976). Fluid inclusion petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S.G.S. *Geological Survey Professional Paper 907-D*, 16 p. doi: 10.3133/pp907D
- Potter, R.W., Clynne, D.L. y Brown, D.L. (1978). Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Economic Geology*, 73 (2), 284-285. Doi: 10.2113/gsecongeo.73.2.284
- Poupeau, G., Sabil, N., Villa, I.M., Bigazzi, G., Vatin-Perignon, N., Flores, P., Pereyra, P., Salas, G., y Arroyo, G.(1992). Fission-track and K-Ar ages of “macusanite” obsidian glasses, (SE Peru): Geodynamic implications. *Tectonophysics*, 205(1-3), 295-305. doi: 10.1016/0040-1951(92)90432-6
- Takenouchi, S. y Kennedy, G.C. (1965). The Solubility of Carbon Dioxide in NaCl Solutions at High Temperatures and Pressures. *American Journal of Science*, 263(5), 445-454. Doi: 10.2475/ajs.263.5.445



Tingley, J.V. & Bonham, H.F. (1986). Sediment-hosted precious-metal Deposits of Northern Nevada. *Nevada Bureau of Mines and Geology*. Report 40, 71-79p.

Recuperado

de

https://books.google.com.pe/books?id=JFQjeLxi9z4C&pg=PA71&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false

White, N.C. y Hedenquist, J.W. (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1-3), 445-474. Doi: 10.1016/0375-6742(90)90063-G



X. ANEXOS