

**Apoyo práctico en actividades de exploración brownfield en sulfuros masivos
volcanogénicos del proyecto minero Miner S.A/Minera El Roble, Carmen de Atrato, Chocó**



**MÎNER S.A.
MINERA EL ROBLE**

Juliana Urrutia Vélez

**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales, Caldas
2024**

Apoyo práctico en actividades de exploración brownfield en sulfuros masivos volcanogénicos del proyecto minero Miner S.A/Minera El Roble, Carmen de Atrato, Chocó

Juliana Urrutia Vélez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Geóloga

Asesor académico

MSc. Edwin Naranjo Sierra

Asesor Institucional

Geido Ali Chávez

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales, Caldas
2024

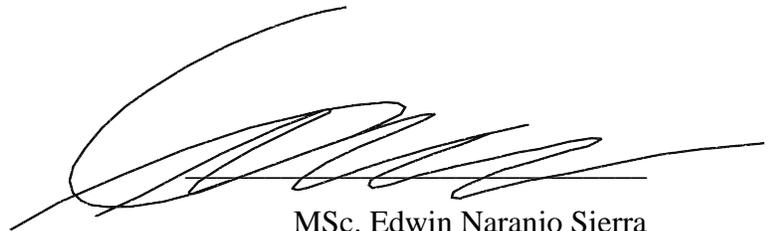
Agradecimientos

A mis madres, Luyuvany y María Estela, por su incondicional apoyo y amor.

A la empresa Miner S.A, por brindarme la oportunidad de culminar mi proceso formativo aprendiendo de la mano de grandes profesionales y seres humanos, a quienes admiro.

A mis profesores y amigos, por ser parte fundamental de mi crecimiento profesional y personal.

Nota de aceptación

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, sweeping initial 'E' followed by several smaller, connected loops and a long horizontal stroke extending to the right.

MSc. Edwin Naranjo Sierra
Asesor Académico

Resumen

Este informe aborda la participación en el proyecto de exploración brownfield del sulfuro masivo volcanogénico de la mina El Roble, en Carmen de Atrato, Chocó - Colombia. El objetivo fue contribuir al conocimiento de la distribución y características del target exploratorio denominado "Cuerpo A", para lo cual se ejecutó una malla de perforación *infill*. Se realizó el logueo detallado, muestreo, medición del *survey* y modelamiento 3D de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* que interceptaron exitosamente dicho target. El logueo detallado de los pozos proporcionó información valiosa sobre las características y distribución de las unidades litológicas. El muestreo permitió conocer las leyes de cobre y oro de los interceptos. La medición del *survey* (azimut e inclinación) brindó datos precisos sobre la trayectoria de los pozos. Las interpretaciones geológicas con base al modelamiento 3D de los pozos en el software Leapfrog Geo fueron de utilidad para la comprensión de las características geológicas del depósito, lo que establece una base sólida para las futuras actividades de exploración y explotación. Los resultados obtenidos validaron la extensión del Cuerpo A en la zona perforada y ampliaron la estimación del tonelaje asociado al depósito, lo que representa contribuciones valiosas al cumplimiento del objetivo fundamental del proyecto: ampliar la vida útil de la mina.

Palabras clave: Exploración brownfield, perforación *infill*, sulfuro masivo volcanogénico, mina El Roble

Abstract

This report addresses the participation in the brownfield exploration project of the massive volcanogenic sulfide deposits at the El Roble mine, in Carmen de Atrato, Chocó - Colombia. The objective was to contribute to the knowledge of the distribution and characteristics of the exploratory target called "Cuerpo A", for which an infill drilling campaign was completed. Detailed logging, sampling, survey measurement and 3D modeling of the *ATD-0199*, *ATD-0204* and *ATD-0205* drillholes that successfully intercepted that target were carried out. Detailed drillhole logging provided valuable information of the characteristics and distribution of the lithological units. The sampling allowed us to know the copper and gold grades of the intercepts. Survey measurements (azimuth and inclination) provided accurate data of the trajectory of the drillholes. Geological interpretations based on 3D modeling of drillholes in Leapfrog Geo software were useful for understanding the geological characteristics of the deposit, establishing a solid foundation for future exploration and exploitation activities. The results validated the extension of "Cuerpo A" in the drilled area and expanded the estimate of the tonnage associated with the deposit, which represents valuable contributions to achieve the fundamental objective of the project in extending the life of the mine (LOM).

Keywords: Brownfield exploration, infill drilling, volcanogenic massive sulfide, copper, El Roble mine

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	4
3. Objetivos.....	5
3.1 Objetivo general.....	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
4. Marco Teórico.....	6
4.1 Sulfuro masivo volcanogénico (VMS).....	6
4.1.1 Genesis.....	7
4.1.2 Zonación mineralógica.....	8
4.1.3 Alteraciones hidrotermales.....	10
4.1.4 Clasificación.....	11
4.1.5 Ambiente tectónico.....	13
4.2 Perforación.....	14
4.2.1 Perforación diamantina con wireline.....	15
4.2.2 Perforación infill.....	16
4.3 Exploración brownfield.....	16
4.4 Abreviaturas.....	17
5. Marco geológico.....	19
5.1 Geología regional.....	19
5.1.1 Formación Barroso (Kvb).....	19
5.1.2 Formación Penderisco.....	20
5.1.2.1 Miembro Urrao (Ksaau).....	20
5.1.2.2 Miembro Nutibara (Kcln).....	20
5.1.3 Complejo Santa Cecilia – La Equis (Kvsc-Tvx).....	21
5.1.4 Batolito de Mandé (Tcmm).....	21
5.1.5 Batolito de Farallones (Tmcf).....	21
5.1.6 Depósitos cuaternarios (Qal).....	22
5.2 Geología estructural regional.....	24
5.2.1 Falla La Mansa.....	24
5.2.2 Falla La Mariela W (Guangarales).....	24
5.2.3 Falla San Lorenzo.....	24

5.2.4	Falla San Francisco.....	25
5.3	Geología local	25
5.3.1	Basaltos (Kv)	26
5.3.2	Chert negro (Kbs)	27
5.3.3	Sulfuro masivo (SM)	28
5.3.4	Chert gris (Kgc)	28
5.3.5	Rocas sedimentarias (Kss).....	29
5.3.7	Brecha hidrotermal (HBx)	30
5.3.8	Intrusivos (Int)	30
5.3.9	Antrópico (Ant)	32
5.4	Geología estructural local	33
5.5	Tipo de depósito.....	34
6.	Metodología.....	37
6.1	Logueo detallado.....	39
6.2	Muestreo de núcleos de perforación	40
6.2.1	Muestreo para análisis multielemental	41
6.2.2	Muestreo para obtención de la densidad.....	44
6.3	Medición de desviación de pozo.....	44
6.4	Modelamiento e interpretación de secciones y columnas estratigráficas	46
7.	Resultados.....	47
7.1	Logueo detallado.....	47
7.1.1	Litología.....	47
7.1.1.1	Cuaternario (Q).....	47
7.1.1.2	Chert gris (Kgc)	48
7.1.1.3	Chert negro (Kbs)	49
7.1.1.4	Sulfuro masivo (SM)	50
7.1.1.5	Basaltos (Kv)	51
7.1.1.6	Intrusivos (Int)	52
7.1.1.7	Brecha hidrotermal (HBx)	53
7.1.2	Alteraciones	54
7.1.2.1	Alteración supérgena	54
7.1.2.2	Silicificación	55

7.1.2.3 Dolomitización (DOL)	55
7.1.2.4 Alteración fílica	56
7.1.2.5 Cloritización	57
7.1.3 Mineralización	57
7.1.4 Estructuras	60
7.2 Muestreo	61
7.3 Medición de pozo.....	64
7.4 Modelamiento 3D de los pozos perforados	65
8. Conclusiones.....	73
9. Recomendaciones	75
Referencias	76

Lista de figuras

Figura 1. Localización de la Mina El Roble.	2
Figura 2. Modelo teórico de formación de los SMV. Tomado de Franklin et al. (2005).....	8
Figura 3. Esquema idealizado de la zonificación de minerales hipógenos en un sistema SMV.....	9
Figura 4. Representación gráfica de las clasificaciones litológicas modificadas de Barrie y Hannington (1999) por Franklin et al. (2005).	13
Figura 5. Diagrama esquemático de los diferentes ambientes de formación de los SMV. Modificado de Galley et al. (2007).	14
Figura 6. Partes de una unidad de perforación diamantina. Tomado de Salas (2016).	15
Figura 7. Esquema explicativo de la perforación <i>infill</i> . Tomado de Satter & Iqbal (2016).	16
Figura 8. Geología regional de las áreas adyacente a la mina El Roble. Plancha 165, Carmen de Atrato. Tomado de Calle & Salinas (2012). Geología estructural tomada de Espinal (2020).	23
Figura 9. Distribución espacial y temporal de las unidades litológicas locales del yacimiento de cobre El Roble. Tomado de Murillo (2020).	25
Figura 10. Geología local: Basaltos (Kv).	26
Figura 11. Chert negro (Kbs).	27
Figura 12. Sulfuro masivo (SM).	28
Figura 13. Chert gris (Kgc).	29
Figura 14. Rocas sedimentarias (Kss).	30
Figura 15. Brecha hidrotermal (HBx).	30
Figura 16. Intrusivos (Int).	32
Figura 17. Antrópico (Ant).	33
Figura 18. Estructura tipo dúplex en contacto SM – Kbs. Tomado de Espinal (2020).	34
Figura 19. Esquemas idealizados del plegamiento general en la secuencia estratigráfica de la mina El Roble. Tomado de Espinal (2020).	34
Figura 20. Esquema de los pozos ejecutados. Tomado de Atico Mining, new release (2023).	38
Figura 21. Método de muestreo de núcleos de perforación. Muestra ATDH-30683 del pozo <i>ATD-0205</i> . From: 208.70 m to:209.70 m.	42
Figura 22. Medición de pozo	45
Figura 23. <i>ATD-0204</i> . Deposito coluvial.	47
Figura 24. Rocas sedimentarias en los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	48
Figura 25. Chert gris en los pozos <i>ATD-0199</i> y <i>ATD-0204</i>	49

Figura 26. Chert negro en los pozos <i>ATD-0199</i> y <i>ATD-0205</i>	50
Figura 27. Sulfuro masivo en los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	51
Figura 28. Basalto en los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	52
Figura 29. Intrusivos en los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	53
Figura 30. Brecha hidrotermal en pozo <i>ATD-0204</i>	54
Figura 31. Alteración súpergena en el pozo <i>ATD-0204</i>	55
Figura 32. Shale dolomitizado en el pozo <i>ATD-0204</i>	56
Figura 33. Alteración sericitica y filica en los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	57
Figura 34. Mineralización en chert gris y areniscas.....	58
Figura 35. Mineralización en intrusivos y brecha hidrotermal.	59
Figura 36. Contactos litológicos en los pozos <i>ATD-0199</i> y <i>ATD-0205</i>	60
Figura 37. Estructuras en el pozo <i>ATD-0199</i>	61
Figura 38. Leyes de Cu y Au del pozo <i>ATD-0199</i>	62
Figura 39. Leyes de Cu y Au del pozo <i>ATD-0204</i>	62
Figura 40. Leyes de Cu y Au del pozo <i>ATD-0205</i>	63
Figura 41. Comparación entre los pozos planeados y perforados, vista en planta.....	66
Figura 42. Columnas estratigráficas para los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	67
Figura 43. Modelo conceptual del Cuerpo A en vista de planta. La nomenclatura indica el final de los sondajes, los cuales se observan como líneas debido a que son sub-horizontales y se encuentran entre 25.0 m y 35.0 m bajo la topografía de superficie. Vista en planta.	70
Figura 44. Secciones longitudinales de los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i> A) Sección de 349° de azimut del pozo <i>ATD-0199</i> . B) Sección de 352° de azimut del pozo <i>ATD-0204</i> . C) Sección de 354° de azimut del pozo <i>ATD-0205</i>	71

Lista de tablas

Tabla 1. Minerales diagnósticos en sulfuros masivos vulcanógenicos alterados hidrotermalmente en diferentes grados de metamorfismo. Tomado de: Shanks, W.C. & Thurston (2012).	11
Tabla 2. Lista de abreviaturas de unidades de medida, elementos químicos, minerales (Whitney & Evans, 2010) y tipos de basalto.	18
Tabla 3. Survey, profundidad programada y profundidad objetivo de los pozos planeados. Se omite el collar por razones de confidencialidad	38
Tabla 4. Códigos y colores para la clasificación de litología mayor y menor.	40
Tabla 5. Resumen de los interceptos de los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	63
Tabla 6. Resultados de densidad de los pozos <i>ATD-0199</i> , <i>ATD-0204</i> y <i>ATD-0205</i>	63
Tabla 7. Resultados de la medición del pozo <i>ATD-0199</i>	64
Tabla 8. Resultados de la medición del pozo <i>ATD-0204</i>	64
Tabla 9. Resultados de la medición del pozo <i>ATD-0205</i>	65

1. Introducción

Miner S.A/Minera El Roble es una mina subterránea situada en el flanco oriental de la Cordillera Occidental de Colombia en el departamento del Chocó, 3 kilómetros al norte de la cabecera municipal de Carmen de Atrato (Figura 1). Esta mina pertenece a la compañía Atico Mining Corporation desde 2013, aunque su historia productiva se remonta desde 1990. Esta mina se dedica a la exploración y extracción de concentrado de cobre, oro y plata, y actualmente es la única mina de cobre en Colombia en etapa productiva.

Minera El Roble cuenta con su propia planta de beneficio, cuya capacidad nominal de procesamiento es de 1000 toneladas por día. Según el último reporte técnico NI 43-101 publicado en diciembre de 2020, durante los últimos 25 años ha procesado aproximadamente 2,5 millones de toneladas de mineral con una ley promedio de 2,67% de cobre y un estimado de 2,63 g/t de oro; y sus reservas probadas y probables equivalen 1,00 Mt de 3,02% de cobre y 1,76g/t de oro.

La explotación se lleva a cabo en un depósito tipo sulfuro masivo volcanogénico (SMV), representando fuentes significativas de cobre y zinc, y en menor medida, plomo, plata, oro, cadmio, selenio, estaño y bismuto (Franklin et al., 2005). Este tipo de depósitos son singenéticos y se forman sobre y debajo del lecho marino debido a la descarga de fluidos hidrotermales de elevada temperatura originados por una fuente de calor, como una intrusión hipoabisal, la cual genera, impulsa y mantiene el sistema hidrotermal (Cathles 1981; Cathles et al., 1997) en el que agua marina desempeña un papel crucial (Franklin et al., 1981).

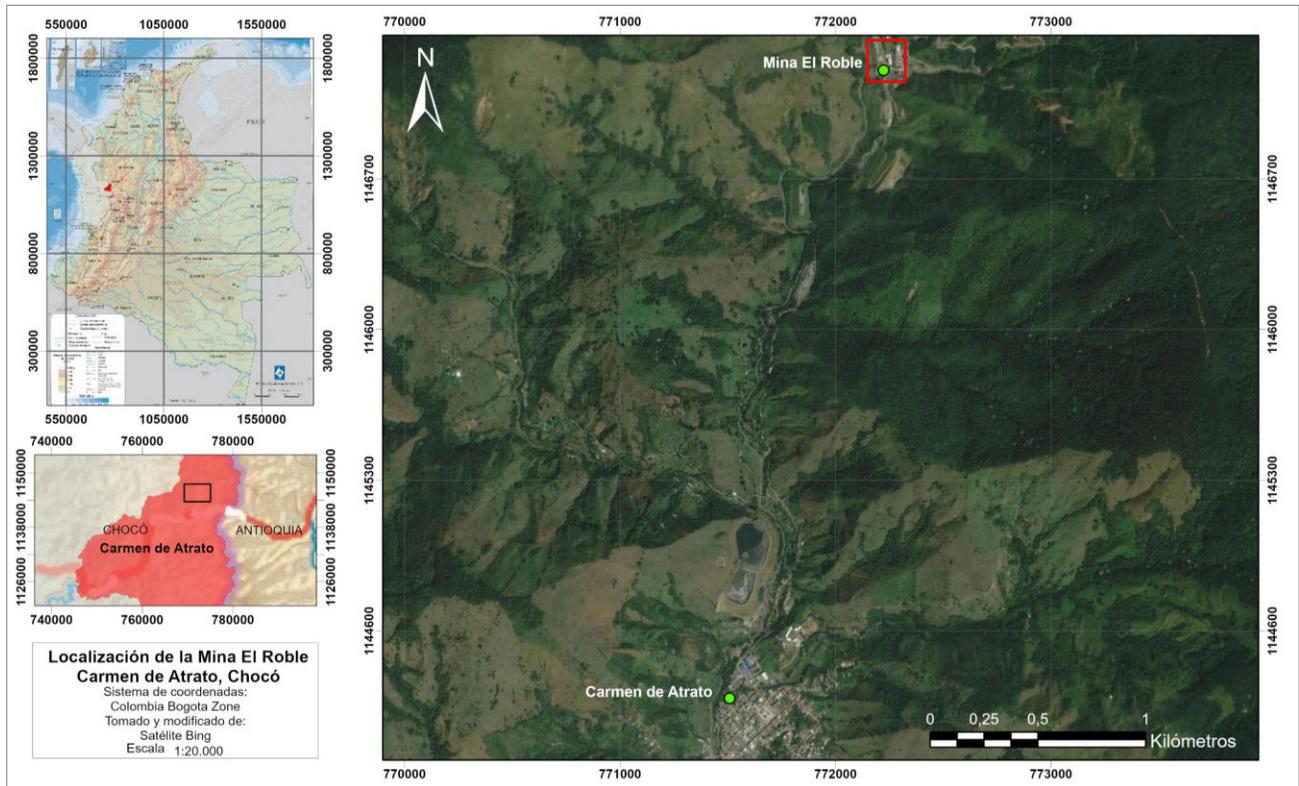


Figura 1. Localización de la Mina El Roble.

A escala regional, las unidades cronoestratigráficas aflorantes en la operación minera El Roble pertenecen al Grupo Cañasgordas, conformado por las Formaciones Barroso y Penderisco (Álvarez & González, 1978). La unidad más antigua es la Formación Barroso, una unidad volcánica máfica de edad Aptiano - Coniaciano (Etayo et al., 1980) compuesta por rocas volcánicas efusivas, basaltos, tobas e intercalaciones de rocas sedimentarias; y es suprayacida por la Formación Penderisco que se subdivide en el Miembro Urrao y el Miembro Nutibara, de composición clástica y calcáreo/silíceo respectivamente (Álvarez & González, 1978).

Por otra parte, a nivel local, se clasifican cinco unidades litoestratigráficas mayores. Una unidad basal compuesta por flujos basálticos que según análisis de roca total (NaO, K₂O, MgO, FeO) informados por Ortiz et al. (1988) se sitúan en el campo toleítico. La segunda unidad denominada Chert negro, de 30 metros de espesor promedio que grada ascendente hasta una tercera

unidad sedimentaria pelágica denominada Chert gris, de hasta 120 metros de espesor. En el Chert negro se hospeda el sulfuro masivo, el cual contiene concentraciones variables de calcopirita, pirita, pirrotina, esfalerita y oro electrum. Sobre esta secuencia, se deposita una cuarta unidad turbidítica de varios kilómetros de espesor, compuesta por arenisca y lutitas. Finalmente, el sulfuro masivo y las cuatro unidades litoestratigráficas anteriormente descritas son intruidas por diques andesíticos y latíticos (Kelly, 2020).

En la actualidad, las actividades de explotación se concentran en el cuerpo Zeus, emplazado aproximadamente 450 metros por debajo de la topografía de superficie. Se accede a Zeus a través de una rampa principal con sección nominal de 4,5 m x 4,5 m partiendo del nivel 1880. Este cuerpo se explota por el método de corte y relleno en cámara y pilares ascendentes, y a pesar de su amplia extensión, su fin es inminente. En respuesta a esta situación y con el fin de extender la vida útil de la mina, en enero de 2023 Miner S.A dio inicio a la campaña de exploración brownfield dirigida al estudio de cinco cuerpos mineralizados remanentes de actividades de explotación antiguas, denominados: Cuerpo Principal, Cuerpo A, Cuerpo B, Cuerpo C y Cuerpo D.

En el presente informe se detalla la metodología empleada y los resultados obtenidos del respaldo práctico prestado al área de Geología de la compañía Miner S.A durante los seis meses de duración de la práctica académica. Lo anterior, sobre los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* dirigidos al target exploratorio Cuerpo A.

2. Justificación

La minería desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico de Colombia al contribuir al progreso económico y social de diversas regiones. Según la información proporcionada por la Asociación Colombiana de Minería (ACM) en el año 2022 la minería aportó 15 billones de pesos a la nación representando aproximadamente el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Estos ingresos generados por la minería tienen un impacto significativo en otros sectores de la economía, como el transporte, la industria y los servicios, contribuyendo así al desarrollo general del país-

En virtud de lo anterior, resulta imperativo para el país orientar sus esfuerzos hacia la investigación y aprovechamiento de recursos minerales, como el cobre, el cual desempeña un papel fundamental en el marco de la transición energética a nivel global. De acuerdo con un análisis del Hub de Innovación de Cobre, se proyecta que Colombia esté en condiciones de abastecer el 50% de la demanda mundial para el año 2030, cifra que se traduce en 700.000 mil toneladas, lo que representa una oportunidad estratégica para el país.

No obstante, en la actualidad la única mina en fase productiva de concentrado de cobre en Colombia es Minera El Roble S.A, la cual se encuentra actualmente en la explotación de las últimas extensiones del cuerpo mineral conocido como Zeus, localizado entre los 1670 y 1875 msnm, con un espesor promedio de 35 metros (Smith y Pohl, 2012). En este sentido, surge la necesidad de crear estrategias que posibiliten la continuidad y ampliación de la producción de cobre en el territorio nacional, como las que se están desarrollando actualmente en Minera El Roble.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del pregrado para contribuir al desarrollo exitoso de la campaña de exploración brownfield de la empresa Miner S.A, mediante el apoyo práctico en el desarrollo de actividades exploratorias sobre los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* dirigidos al target exploratorio Cuerpo A.

3.2 Objetivos específicos

- Describir litología, alteración, mineralización y estructuras presentes en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*; y registrar dicha información en la base de datos de la compañía.
- Muestrear los interceptos de sulfuro masivo en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* para análisis multielemental y de densidad.
- Medir la variación de azimut e inclinación de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*.
- Modelar los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*, haciendo uso del software Leapfrog Geo.

4. Marco Teórico

4.1 Sulfuro masivo volcanogénico (VMS)

Los VMS son depósitos singenéticos exhalativos que están intrínsecamente ligados al vulcanismo contemporáneo, ya que se forman simultáneamente con la actividad volcánica submarina asociada (Franklin, 2015). Consisten en acumulaciones estratiformes o lenticulares de sulfuro masivo polimetálico que precipitaron en ambientes volcánicos submarinos cerca del fondo marino o en él, como consecuencia del contraste fisicoquímico del fluido hidrotermal enriquecido en metales con el agua de mar (Galley et al., 2007).

Dichas acumulaciones se hospedan en secuencias volcánicas, sedimentarias o volcano-sedimentarias y se manifiestan en grupos denominados comúnmente como “clusters” que están restringidos a niveles estratigráficos específicos, los cuales pueden indicar cambios en la composición de las rocas volcánicas, el inicio de procesos de sedimentación o simplemente pausas en la actividad volcánica submarina (Sangster, 1980).

Son fuentes importantes de metales como Zn, Cu, Pb, Ag y Au, y contienen proporciones variables de Co, Sn, Se, Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga y Ge. Algunos también contienen cantidades importantes de As, Sb y Hg (Galley et al., 2007).

Por otra parte, la mineralogía de los depósitos SMV es relativamente simple: el sulfuro dominante suele ser pirita o pirrotina, seguido de calcopirita y esfalerita que se encuentran en cantidades variables y que en algunos casos puede exceder el contenido de sulfuros de hierro (Shanks, W.C. & Thurston, 2012). Además, se encuentra galena, asociada a depósitos bimodales-félsicos y siliciclásticos-félsicos (Galley et al., 2007). También existen ejemplos notables en los que otros minerales abundan en estos depósitos, como bornita en Kidd Creek (Hannington et.al, 1999);

tetraedrita, estibina y rejalgar en Eskay Creek y estannita y casiterita en Neves Corvo y Kidd Creek (Roth et.al, 1999).

Según Franklin (2015) los SMV se componen de dos partes: un cuerpo concordante estratificado con forma tabular o de montículo, compuesto principalmente de minerales de sulfuro (>40%); y una mineralización de sulfuros estilo *stockwork*, discordante a semidiscordante, que subyace dicho montículo y a través del cual los fluidos son conducidos hacia la superficie (Figura 3).

4.1.1 Genesis

Se consideran tres elementos esenciales para la formación de sistemas hidrotermales SMV (modificado de Franklin et al., 2005) (Figura 2):

1. Una fuente de calor ubicada en la parte superior de la corteza (<12 km), en la zona de permeabilidad, capaz de iniciar y sostener el sistema hidrotermal convectivo de 400°C a 300°C responsable de la formación de un depósito SMV.
2. Una zona de reacción de alta temperatura en la que se genere la lixiviación de los metales por la interacción del agua de mar con estratos de rocas sedimentarias y/o volcánicas. Esta zona debe incluir una capa de roca impermeable que aisle el sistema hidrotermal.
3. La presencia de fallas sinvolcánicas profundas y penetrantes que permitan el transporte del fluido hidrotermal. Por esto, los SMV están preferentemente en zonas de rift, donde confluye el vulcanismo, los fluidos de alta temperatura y la permeabilidad de los estratos.

La confluencia de estos tres elementos, origina:

4. Una zona de alteración hidrotermal en las rocas circundantes, producto de la circulación del fluido hidrotermal ascendente. La alteración de los estratos de roca que subyacen el depósito se denomina “pipa de alteración” (Price, 1953).

5. La formación del depósito en sí, cuya concentración de metales es modificada por eventos hidrotermales posteriores sucesivos.
6. La formación de productos distales exhalativos como chimeneas negras o blancas.

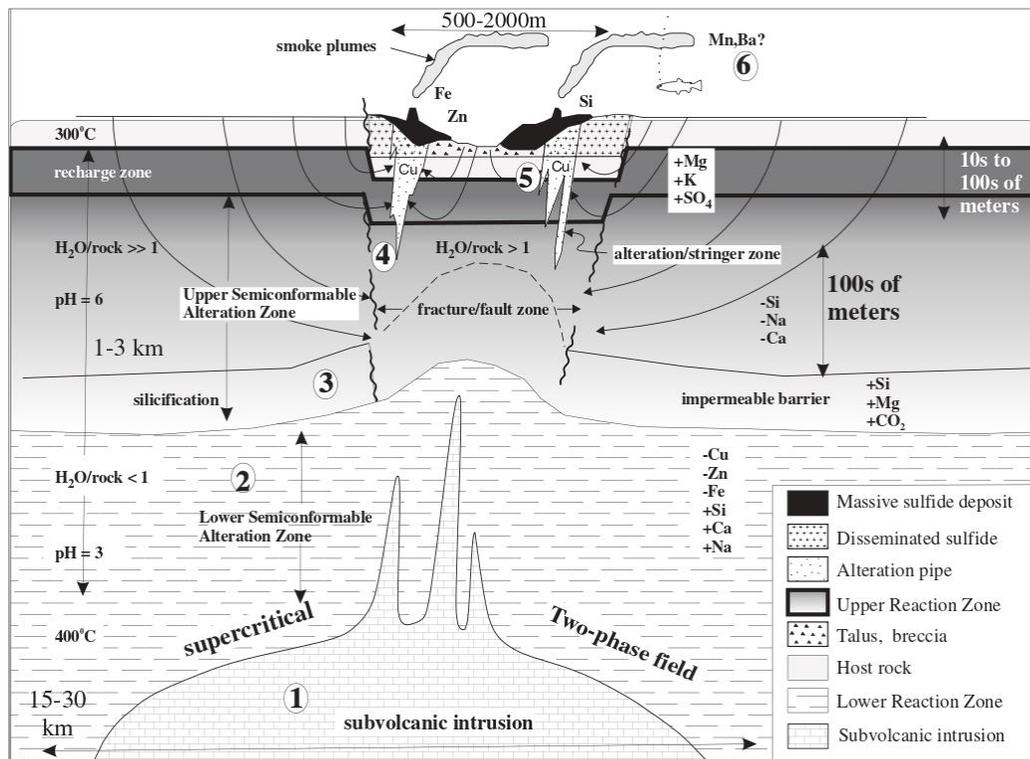


Figura 2. Modelo teórico de formación de los SMV. Tomado de Franklin et al. (2005). 1. Fuente de calor encargada de iniciar, impulsar y mantener el sistema convectivo hidrotermal. 2. Zona de reacción de alta temperatura. 3. Fallas sinvolcánicas responsables del transporte del fluido hidrotermal. 4. Zona de alteración hidrotermal. 5. Formación del depósito SMV. 6. Productos distales exhalativos.

4.1.2 Zonación mineralógica

La zonación mineralógica de los SMV destaca como uno de sus rasgos más distintivos, y se presenta tanto en la zona de *stockwork* como en el lente concordante, como consecuencia del enfriamiento de los fluidos mineralizantes (Gómez, 2014).

La zona de *stockwork* está dominada por calcopirita + pirita + pirrotina ± magnetita, la parte basal del lente concordante de sulfuro masivo está dominada por pirita + calcopirita ± pirrotina, y los

márgenes superior y exterior del sulfuro masivo están dominados por esfalerita ± galena (± barita) (Lambert y Sato, 1974) (Figura 3).

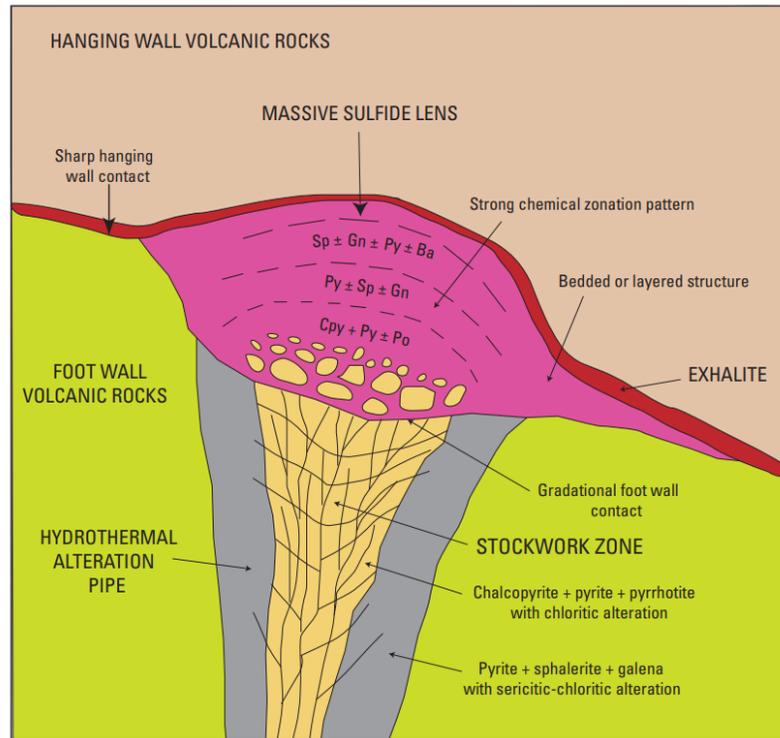


Figura 3. Esquema idealizado de la zonificación de minerales hipógenos en un sistema SMV. Tomado de Shanks, W.C. & Thurston, (2012). [ba, barita; cpy, calcopirita; gn, galena; po, pirrotita; py, pirita; sp, esfalerita].

Pisutha-Arnond & Ohmoto (1983) han atribuido dicha zonificación horizontal y vertical a episodios secuenciales de depositación y reemplazamiento de sulfuros dentro de un sistema geotérmico con variaciones de temperatura. Inicialmente, se genera la precipitación temprana de sulfuros (protore) en el fondo marino a temperaturas entre 200° y 330°C formando pirita, esfalerita y galena, y minerales de ganga como cuarzo y barita. Posteriormente, el aumento de la temperatura del fluido hidrotermal en la base del lente mineral en crecimiento, junto con su continua circulación en el sistema hidrotermal, produce el reemplazamiento de dichos sulfuros tempranos por calcopirita, durante un máximo térmico a temperaturas de 330° ± 50°C, generando la “zona de refinamiento” (*zone refining*) que refleja una variación en la temperatura o composición del fluido hidrotermal, debido al cambio de la fuente térmica o una menor interacción con el agua de mar por

la acción de la roca sello (Franklin et. al, 2005). Finalmente, el Zn y Pb movilizados de dicho reemplazamiento migran vertical y lateralmente, y precipitan como esfalerita y galena respectivamente en las zonas más distales y frías del lente de sulfuro masivo a temperaturas de aproximadamente $260^{\circ} \pm 50^{\circ}\text{C}$ (Pisutha-Arnond & Ohmoto, 1983).

4.1.3 Alteraciones hidrotermales

Las alteraciones hidrotermales producidas por reacción geoquímicas en los estratos circundantes son de importancia crítica por varias razones (Shanks, W.C. & Thurston, 2012):

- Proporcionan evidencia de la trayectoria y condiciones físicas y químicas de los fluidos.
- Si existe una disposición sistemática pueden permitir la vectorización hacia depósitos no descubiertos.
- Proporcionan información clave sobre el origen de los elementos metálicos en los depósitos.

La intensidad de la alteración de los estratos subyacentes al SMV es moderada a localmente intensa; en el caso de secuencias máficas la más común es la cloritización, y está menos desarrollada a medida que aumenta la profundidad y la distancia respecto a la zona de circulación de los fluidos hidrotermales; y en secuencias félsicas se encuentra ampliamente desarrollada la alteración cuarzo-sericitica. La alteración en los estratos suprayacentes suele estar ausente, pero puede desarrollarse débilmente en algunos depósitos. Las zonas de *stockwork* se caracterizan por vetas de sulfuro y cuarzo anastomosadas, con zonas locales de silicificación cerca y dentro de las zonas mineralizadas (Cliff D.T et al., 1986).

Los primeros estudios sobre alteraciones hidrotermales (Sales & Meyer, 1948) condujeron a las denominaciones comúnmente reconocidas: potásica, argílica, fílica y propilítica. Bonnet &

Corriveau (2007) conservaron algunos de estos términos de clasificación para los depósitos SMV, pero sustituyeron el fílico por el sericítico y, al igual que otros investigadores, agregaron la alteración clorítica como una zona de alteración importante en entornos del subsuelo marino y la argílica avanzada, como producto de condiciones altamente ácidas y de alto estado de sulfuración, características de la oxidación de SO₂ o H₂S cerca del fondo marino (o de la superficie) para producir ácido sulfúrico. Estudios detallados de Bonnet y Corriveau (2007) sobre SMV metamorfoseados indicaron que los minerales de alteración primaria se transforman en conjuntos minerales predecibles de mayor temperatura y presión (Tabla 1).

Tabla 1. Minerales diagnósticos en sulfuros masivos vulcanógenicos alterados hidrotermalmente en diferentes grados de metamorfismo. Tomado de: Shanks, W.C. & Thurston (2012).

Alteration type	Diagnostic minerals: unmetamorphosed deposits	Diagnostic minerals: greenschist facies	Diagnostic minerals: granulite facies
Advanced argillic	Kaolinite, alunite, opal, smectite	Kaolinite, pyrophyllite, andalusite, corundum, topaz	Sillimanite, kyanite, quartz
Argillic	Sericite, illite, smectite, pyrophyllite, opal	Sericite, illite, pyrophyllite	Sillimanite, kyanite, quartz, biotite, cordierite, garnet
Sericitic	Sericite, illite, opal	Sericite, illite, quartz	Biotite, K-feldspar, sillimanite, kyanite, quartz, cordierite, garnet
Chloritic	Chlorite, opal, quartz, sericite	Chlorite, quartz, sericite	Cordierite, orthopyroxene, orthoamphibole, phlogopite, sillimanite, kyanite
Carbonate propylitic	Carbonate (Fe, Mg), epidote, chlorite, sericite, feldspar	Carbonate (Fe, Mg), epidote, chlorite, sericite, feldspar	Carbonate, garnet, epidote, hornblende, diopside, orthopyroxene

4.1.4 Clasificación

Existen múltiples clasificaciones para los sulfuros masivos volcanogénicos, pero son tres las más ampliamente utilizadas. La más común, formulada por Franklin et al. (1981) y posteriormente ajustada por Franklin et al. (2005), agrupan estos depósitos en función de su contenido de metales base (Cu,Zn o Pb) clasificándolos en tres categorías: Cu-Zn, Zn-Pb-Cu y Zn-Pb (SEDEX). Poulsen

y Hannington (1995), por su parte, establecieron una categorización bimodal sencilla para los depósitos SMV, diferenciándolos entre "normales" y "ricos en oro", definiendo estos últimos como aquellos en los que la concentración de oro en partes por millón (ppm) supera numéricamente la suma de los metales base combinados (Zn+Cu+Pb, expresados en % en peso). El tercer sistema de clasificación, es la agrupación quíntuple sugerida por primera vez por Barrie y Hannington (1999) y posteriormente modificada por Franklin et al. (2005) que los clasifica por sus litologías hospedantes que definen un evento estratigráfico temporal distintivo (Franklin et al., 2005): (1) Siliciclásticos-félsicos, ocurren en arcos epicontinentales maduros y se componen por estratos sedimentarios y vulcanoclásticos derivados del continente; (2) Pelítico-máficos (p. ej., Besshi), ocurren en cuencas oceánicas maduras tipo backarc con proporciones casi iguales de sedimentos pelíticos y basalto; (3) Máficos (p. ej., Chipre), ocurren en cuencas oceánicas primitivas tipo backarc y están tipificados por secuencias ofiolíticas con menos del 10% de sedimentos; (4) Máficos bimodales, ocurren en arcos oceánicos de suprasubducción con menos del 25% de estratos félsicos; y (5) Félsicos bimodales, ocurren en arcos epicontinentales de suprasubducción y se distinguen por estratos volcánicos félsicos que constituyen entre el 35% y 70% del depósito (Figura 4). Los depósitos tipo pelítico-máficos, máficos y máficos bimodales son predominantemente de Cu-Zn, mientras que los siliciclásticos-félsicos y los félsicos bimodales contienen una cantidad significativa de Pb.

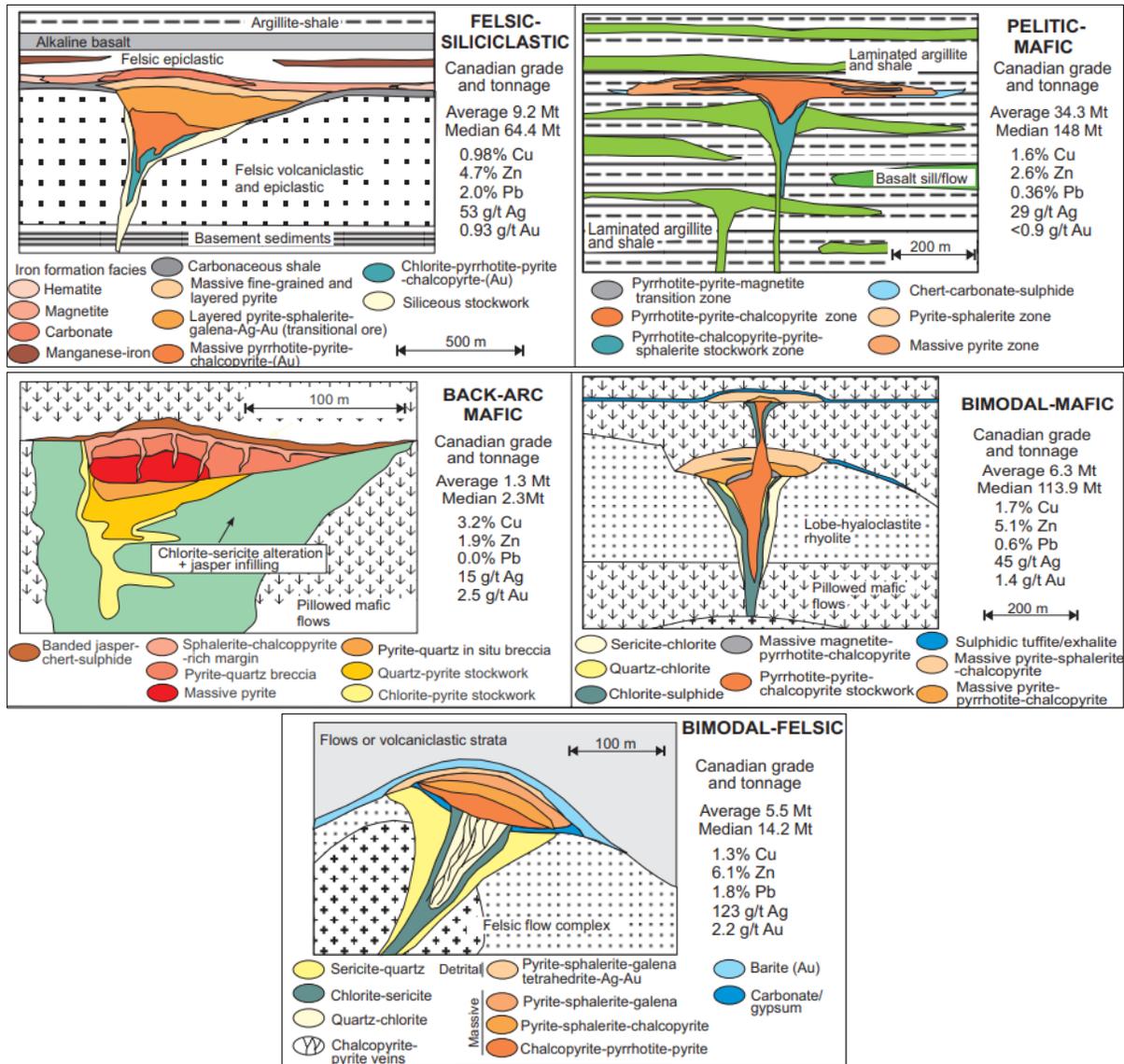


Figura 4. Representación gráfica de las clasificaciones litológicas modificadas de Barrie y Hannington (1999) por Franklin et al. (2005). Se presenta el tamaño y ley promedio para cada tipo en relación a depósitos canadienses representativos. Tomado de Galley et al., (2007).

4.1.5 Ambiente tectónico

Los sulfuros masivos volcanogénicos se forman en entornos tectónicos marinos donde existe una relación entre el magmatismo, la sismicidad y la circulación de fluidos hidrotermales de alta temperatura. Estos entornos incluyen dorsales oceánicas, arcos volcánicos (en márgenes oceánicos o continentales) y cuencas retroarco (trasarco o back-arc) (Schulz & Morgan, 2012) (Figura 5).

En los océanos modernos, la mayor parte de la actividad hidrotermal conocida se localiza a lo largo de las dorsales oceánicas (65%), y el resto en cuencas de arco posterior (22%), a lo largo de arcos volcánicos (12%) y en volcanes intraplaca (1%). En contraste, la mayoría de los depósitos SMV conservados en el registro geológico parecen haberse formado en arcos volcánicos oceánicos y continentales y en cuencas trasarco. La escasez de depósitos formados en dorsales oceánicas probablemente refleja la subducción y el reciclaje de la corteza del fondo del océano desde al menos el Paleoproterozoico; considerando que la corteza oceánica actual no tiene más de 180 millones de años (Hannington, 1999).

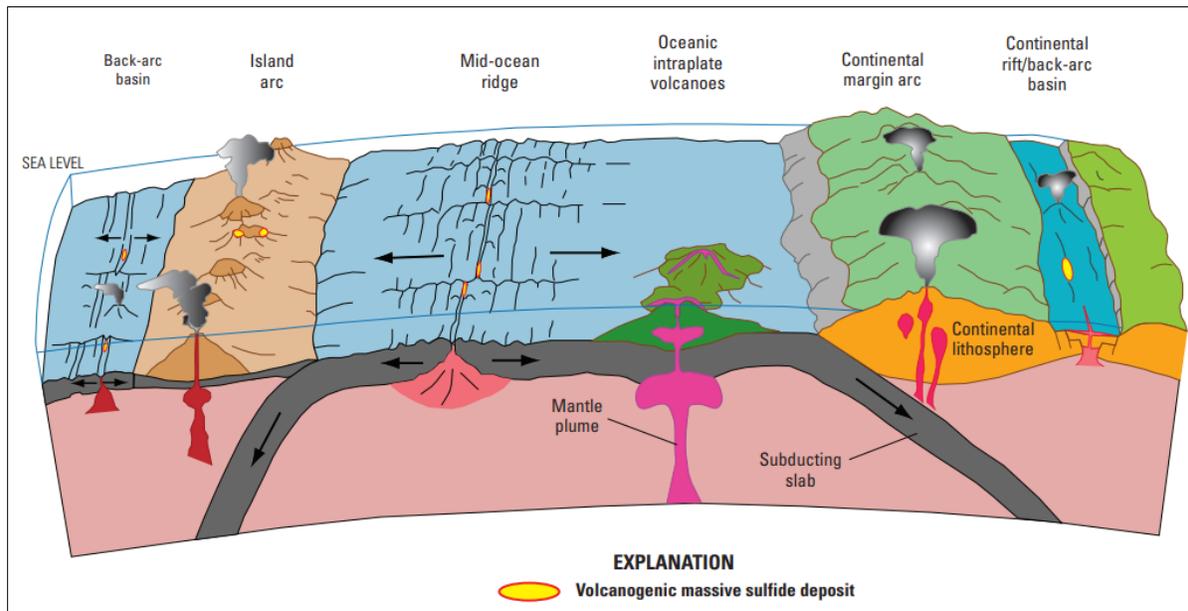


Figura 5. Diagrama esquemático de los diferentes ambientes de formación de los SMV. Modificado de Galley et al. (2007).

4.2 Perforación

La perforación en minería, independiente del método, se basa en un mismo principio: la percusión y el giro continuo de una broca para generar un corte en la roca. Su objetivo puede ser facilitar la extracción de recursos mediante el método de voladura al insertar explosivos en taladros (huecos

cilíndricos perforados en los macizos rocosos) o recuperar los núcleos de roca para fines exploratorios.

4.2.1 Perforación diamantina con wireline

Este método de perforación es especialmente efectivo para actividades de exploración geológica, ya que es el único que permite la recuperación íntegra del núcleo de perforación. Como su nombre lo indica la broca se compone de material diamantado, que por su dureza (10 en la escala de Mohs) proporciona la resistencia necesaria para la perforación en rocas compactas y duras.

Los equipos de perforación diamantina constan de una torre de perforación, una sarta de perforación y una broca o corona de diamante. La broca diamantina se ubica frente a la sarta de perforación (Figura 6) y su función es perforar la roca y posteriormente el material extraído es almacenado en el tubo interno o tubo portatestigo. A diferencia de la perforación convencional, en la perforación con *wireline* no es necesario retirar la sarta de perforación por completo para obtener el testigo, en cambio, solo se retira el tubo interno (Salas, 2016).

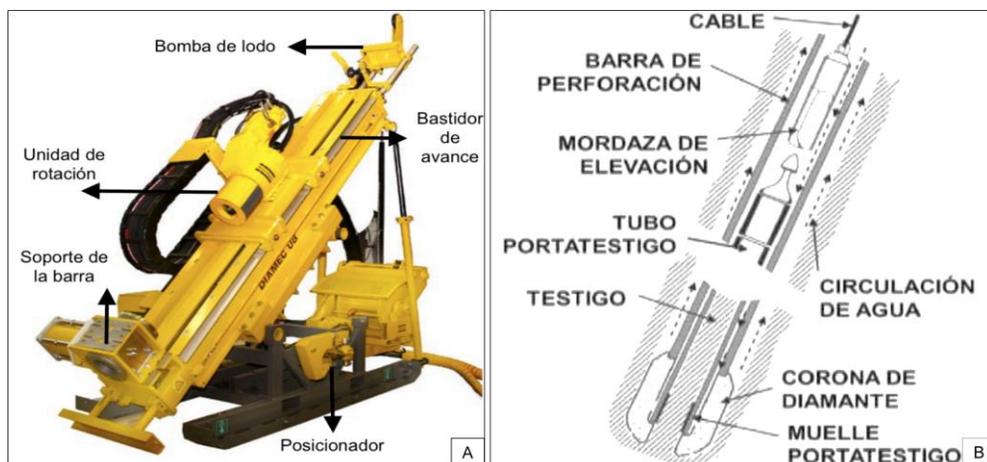


Figura 6. Partes de una unidad de perforación diamantina. Tomado de Salas (2016). A) Partes de una máquina de perforación. B) Sistema de funcionamiento de la perforación diamantina *wireline*.

4.2.2 Perforación infill

En exploración minera la perforación *infill* (de relleno), se refiere a las perforaciones que se realizan con el fin de disminuir el espaciamiento entre pozos pre existentes (Figura 7). Al realizar pozos más cercanos entre sí, en comparación con las perforaciones originales, se obtiene una mejor comprensión de la distribución espacial, la geometría y la calidad de los yacimientos minerales, lo cual es fundamental para las empresas mineras ya que permite realizar el cálculo de recursos minerales y el planeamiento de minado.

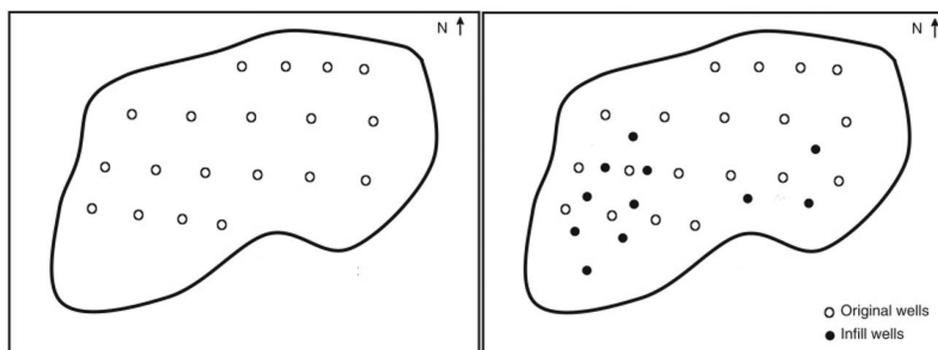


Figura 7. Esquema explicativo de la perforación *infill*. Tomado de Satter & Iqbal (2016).

4.3 Exploración brownfield

La exploración brownfield es aquella que se realiza adyacente a una mina que está en etapa productiva, por tanto, provee información sobre la geología y mineralización del área, a diferencia de la exploración greenfield, que se realiza en zonas “vírgenes”. Su objetivo es ampliar, repotencializar y/o aumentar la etapa de capacidad productiva de una zona previamente minada (Peñaloza, 2020).

Las ventajas de este tipo de exploración son: la reducción del riesgo de fracaso, ya que es posible utilizar, interpretar y extrapolar la información existente; y el ahorro de costos y tiempo en términos de producción y beneficio, en caso de que la mina existente ya tenga un modelo de desarrollo para estas actividades. Sin embargo, un proyecto brownfield debe dirigir sus esfuerzos a la definición

precisa de los recursos minerales, lo que solo se logra mediante la perforación de pozos que permitan conocer, además de otras características, las leyes y tonelaje del depósito (Kamwanje, 2022).

4.4 Abreviaturas

A continuación, se presenta el significado de las abreviaturas utilizadas en el desarrollo del presente informe (Tabla 2).

Tabla 2. Lista de abreviaturas de unidades de medida, elementos químicos, minerales (Whitney & Evans, 2010) y tipos de basalto.

Unidades de medida	
Abreviatura	Término
g/ton	Gramo por tonelada
Mt	Un millón de toneladas secas
ppm	Partes por millón
Elementos químicos	
Ag	Plata
As	Arsenico
Au	Oro
Bi	Bismuto
Cd	Cadmio
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Ga	Galio
Ge	Germanio
Hg	Mercurio
In	Indio
Mn	Manganeso
Pb	Plomo
Sb	Antimonio
Se	Selenio
Si	Sílice
Sn	Estaño
Te	Telurio
Zn	Zinc
Compuestos químicos	
HNO ₃	Ácido nítrico
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Fluoruro de hidrogeno
H ₂ SO ₄	Acido sulfúrico
Minerales (Whitney & Evans, 2010)	
Az	Azurita
Bt	Biotita
Ccp	Calcopirita
Chl	Clorita
Hbl	Hornblenda
Mag	Magnetita
Mlc	Malaquita
Pl	Plagioclasa
Po	Pirrotina
Py	Pirita
Tipos de basalto por afinidad magmática	
MORB	Basaltos de dorsal oceánica
E-MORB	Basaltos de dorsal oceánica enriquecidos
N-MORB	Basaltos de dorsal oceánica normales

5. Marco geológico

5.1 Geología regional

La unidad regional que hospeda el sulfuro masivo de El Roble es el Grupo Cañasgordas del Cretácico Tardío, ubicado al occidente de la Falla Romeral (Álvarez, 1971) de aproximadamente 30 kilómetros de espesor. Se ubica en el Bloque Chocó (Lechner & Eamest, 2010), un terreno oceánico que se acrecentó y obdujó los terrenos oceánicos Gorgona y Romeral del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano de los flancos noroeste de la Cordillera Occidental (Cediel & Shaw, 2003; Taboada et al., 2000). Este grupo está subdividido en las formaciones Barroso y Penderisco (Álvarez & González, 1978). Al oeste del Grupo Cañasgordas se encuentra el Complejo Santa Cecilia – La Equis (Calle & Salinas, 1986), que según Rodríguez y Zapata (2013) corresponde a la parte efusiva del Arco Chocó-Panamá, y la parte plutónica correspondería al Batolito de Mandé y al Batolito de Farallones (Álvarez, 1971) (Figura 8).

5.1.1 Formación Barroso (Kvb)

Se ubica en el borde oriental de la Cordillera Occidental al occidente de la Falla Cauca Almaguer y al oriente de la falla Dabeiba-Pueblo Rico (Rodríguez & Arango, 2012). La Formación Barroso es una unidad volcano-sedimentaria, conformada por lavas basálticas y andesíticas, tobas y aglomerados volcánicos (Rodríguez & Arango, 2013; Rodríguez & Zapata, 2013) que se intercalan con chert, limolitas, margas y capas delgadas de biomicritas. Se considera de edad Aptiano-Coniaciano por la presencia macrofósiles del Aptiano-Albiano (Etayo et al. 1980) y de radiolarios que datan del Turoniano-Coniaciano (Mejía & Salazar, 1989). A pesar de que no existe un consenso sobre la evolución geológica de esta unidad, varios estudios han definido una afinidad toleítica de arco de islas para esta (Rodríguez & Arango, 2013; Rodríguez & Zapata, 2013; Rodríguez, Arango & Bermúdez 2012; Toussaint & Restrepo, 2019).

5.1.2 Formación Penderisco

Son rocas sedimentarias que no han experimentado metamorfismo ni deformación en ningún grado (Espinal, 2020). Esta subdividida en dos miembros: el Miembro Urrao y el Miembro Nutibara (Alvarez & González, 1978), y se le asigna una edad del Campaniano tardío-Paleoceno (Bourgeois et al., 1983).

5.1.2.1 Miembro Urrao (Ksaau).

Esta unidad es producto de la acción de flujos hiperpícnicos en un talud continental que depositaron capas delgadas de arenitas de grano muy grueso a muy fino intercaladas con lodolitas depositadas por turbiditas y conglomerados que se disponen discordantemente sobre la Formación Barroso (Espinal, 2020). Por presencia fósil de radiolarios y foraminíferos, se le asignó una edad del Campaniano-Maastrichtiano (González & Pardo-Trujillo et al., 2002) que corresponde a un ambiente marino con abanicos turbidíticos (Hoyos et al., 1990; González, 2001; Díaz-Cañas, 2015).

5.1.2.2 Miembro Nutibara (Kcln)

Está compuesto por capas delgadas de wackestone con foraminíferos, chert, arcillolitas, limolitas y litoarenitas con silos básicos interestratificados (Zuluaga & Hoyos, 1978). Se han encontrado nanofósiles del Santoniano-Maastrichtiano (Pardo-Trujillo et al., 2020); radiolarios con edades entre el Maastrichtiano-Paleoceno (Bourgeois et al., 1983 en González, 2001) y foraminíferos del Paleoceno tardío-Eoceno temprano (Bourgeois et al., 1983, en Pardo-Trujillo et al., 2020). Se ha determinado que el ambiente de depositación corresponde a un área de plataforma continental (Hoyos et al., 1990).

5.1.3 Complejo Santa Cecilia – La Equis (Kvsc-Tvx)

Data del Campaniano-Paleoceno y se compone por capas de lavas almohadilladas, brechas, aglomerados, tobas e intercalaciones que consisten en limolitas silíceas, lodolitas calcáreas, chert y calizas (González, 1996; Gonzáles & Londoño, 2003).

5.1.4 Batolito de Mandé (Tcmm)

Es un cuerpo elongado en dirección N45°W que bordea el valle del río Atrato por aproximadamente 200 km en los departamentos de Antioquia y Chocó; y se emplaza al oeste del complejo Santa Cecilia - La Equis. Aunque los mapas geológicos muestran un intrusivo de composición homogénea, las facies petrográficas que lo componen son ampliamente variadas e incluyen tonalitas-cuarzodioritas, monzonitas-monzodioritas, dioritas-garbos y pórfidos cuarzodioríticos a tonalíticos (Gonzáles & Londoño, 2003). Dataciones de K/Ar arrojan edades de 34 a 37 m.a, correspondientes al Eoceno (Botero, 1975).

5.1.5 Batolito de Farallones (Tmcf)

Es un cuerpo intrusivo cuya dimensión mayor se emplaza en dirección N10-20°W, aproximadamente paralela a la Cordillera Occidental, y se extiende al sur de Carmen de Atrato hasta el noreste del Corregimiento de San Antonio de Chamí en Risaralda. Se han identificado varias facies petrográficas, que en orden de abundancia corresponden a monzodiorita, tonalita, gabro y piroxenita. La intrusión de este cuerpo en las rocas del Grupo Cañasgordas produjo una aureola de contacto de aproximadamente 500 metros, formando cornubianitas de bajo a medio grado de metamorfismo (Gonzáles & Londoño, 2002). La edad de esta unidad es de 11 + 2 m.a. correspondiente al mioceno tardío (Calle & Salinas, 1986).

5.1.6 Depósitos cuaternarios (Qal)

Están conformados por aluviones y terrazas formadas durante el Cuaternario (desde 2.6 m.a hasta la actualidad).

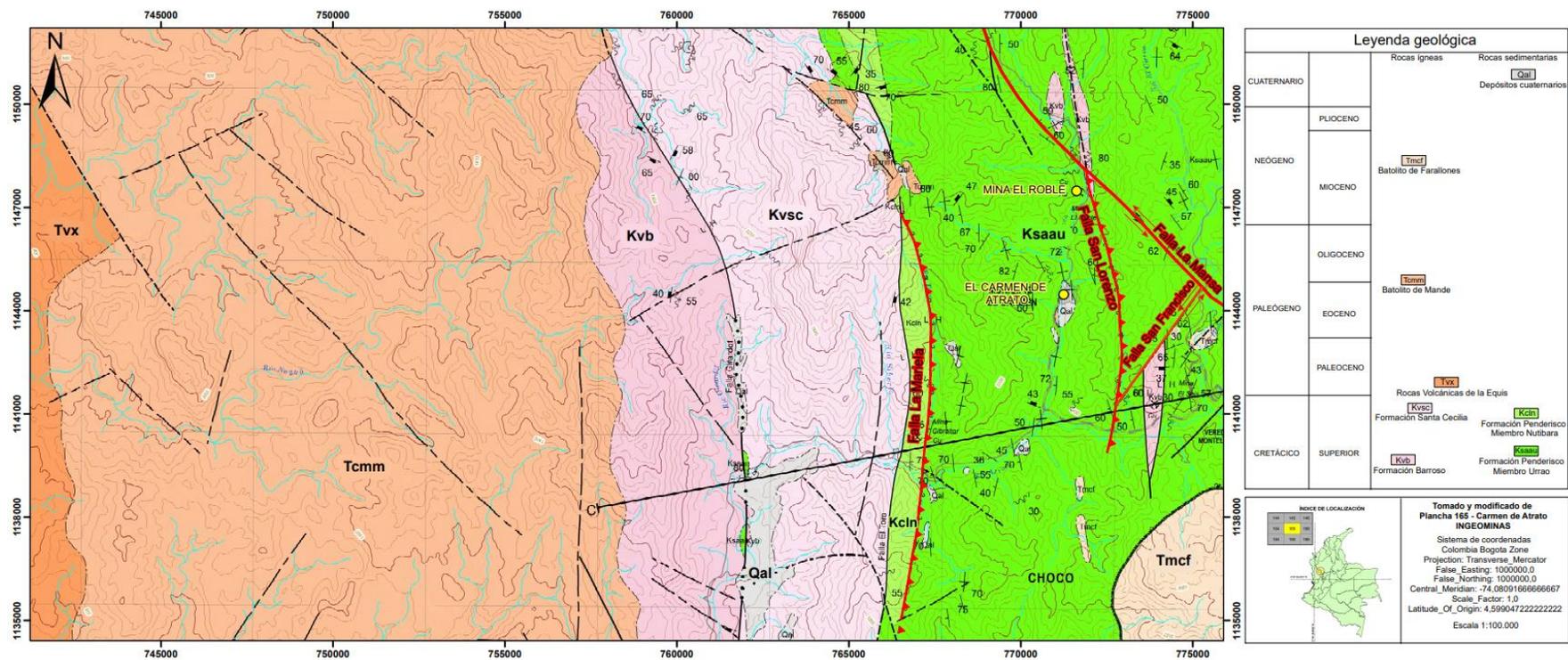


Figura 8. Geología regional de las áreas adyacente a la mina El Roble. Plancha 165, Carmen de Atrato. Tomado de Calle & Salinas (2012). Geología estructural tomada de Espinal (2020).

5.2 Geología estructural regional

5.2.1 *Falla La Mansa*

Se encuentra al noreste de la concesión minera y describe una estructura geológica con orientación N-NW y buzamiento predominante hacia el este. Aunque se ha considerado sinistral, algunos autores sugieren que podría tratarse de una falla normal. En la zona norte, fallas satélites a esta definen el contacto entre las rocas sedimentarias del Miembro Urrao y las rocas volcánicas de la Formación Barroso (Calle & Salinas, 1986). No es clara su influencia en el yacimiento, sin embargo, se postula que puede ser la causante de la formación de cataclasitas reportadas en algunas zonas (Espinal, 2014).

5.2.2 *Falla La Mariela W (Guangarales)*

Se ubica al margen oeste de la concesión minera en dirección N-S y define un movimiento inverso con buzamiento fuerte hacia el este entre 30° y 80°. Esta estructura es responsable del levantamiento de los basaltos de la Formación Barroso, lo que generó una sobreimposición estructural en los sedimentos de la Formación Penderisco (Calle & Salinas, 1986).

5.2.3 *Falla San Lorenzo*

Se ubica en el margen este de la mina en dirección N5W y su movimiento es inverso, con buzamiento de alto ángulo hacia el este. Según Espinal (2020) esta falla es responsable del cabalgamiento de los basaltos de la Formación Barroso sobre las rocas sedimentarias del Miembro Urrao.

5.2.4 Falla San Francisco

Se dispone al sureste de la concesión minera. Se trata de una falla de rumbo con dirección NE-E, de movimiento sinistral e inclinación entre 40°-70° hacia el este, la cual desplaza pequeños bloques del Batolito de Farallones y la Formación Barroso (Arboleda, G. et al., 2009).

Las fallas regionales anteriormente descritas se pueden observar en la figura 8.

5.3 Geología local

Los geólogos de Miner S.A han categorizado las unidades geológicas aflorantes en función de las litologías identificadas en las áreas objeto de exploración y han establecido siete unidades litológicas principales: Basaltos (Kv), Chert negro (Kbs), Sulfuro masivo (SM), Chert gris (Kgc), Rocas sedimentarias (Kss), Brecha hidrotermal (HBx) e Intrusivos (Int) (Figura 9).

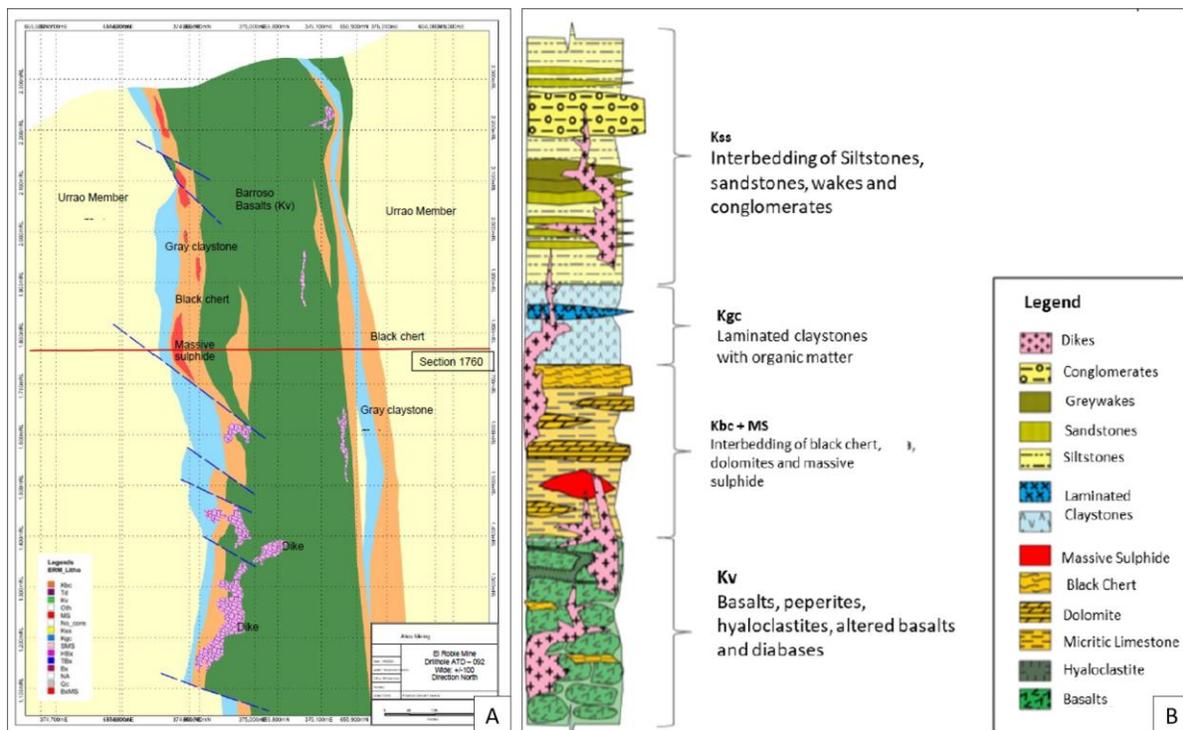


Figura 9. Distribución espacial y temporal de las unidades litológicas locales del yacimiento de cobre El Roble. Tomado de Murillo (2020). A) Sección litológica en asociación con las unidades regionales Formación Barroso y Miembro Urrao. B) Columna estratigráfica idealizada.

5.3.1 Basaltos (Kv)

Esta unidad pertenece a la Formación Barroso y representa el basamento de la secuencia estratigráfica del yacimiento. Abarca lavas almohadilladas que presentan las típicas fracturas ‘‘corteza de pan’’, hialoclastitas y basaltos con texturas variadas entre masivo (Figura 10.A), amigdalares (Figura 10.C) fluidal, brechado y peperítico (Figura 10.B); y son intruidos por grandes volúmenes de diques de composición andesítica que datan del Terciario (Pratt, 2014). Son de afinidad toleítica de tipo MORB (Ortiz et. al., 1990) y según Murillo (2020) tienen al menos dos fuentes de manto diferente: N-MORB y E-MORB. Se observan frecuentemente con tonalidades verdes debido a la alteración clorítica pervasiva, y contiene sulfuros como pirita y pirrotina en proporciones menores al 1%.

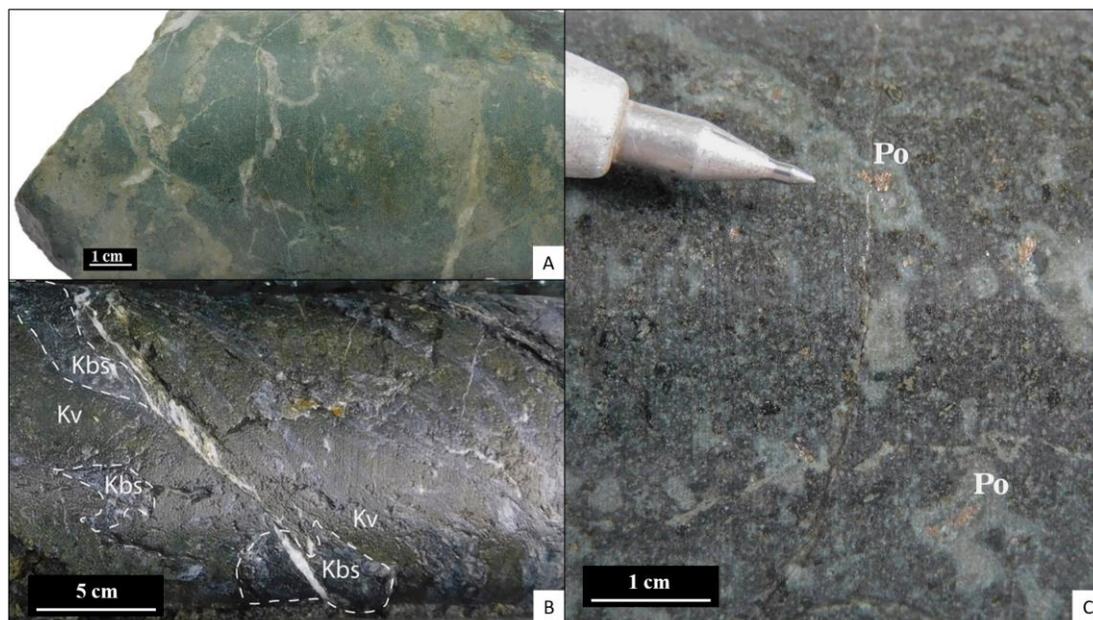


Figura 10. Geología local: Basaltos (Kv). A) Basalto cloritizado con venillas rellenas de carbonatos. Pozo ATD-0216 a 196.80 m. B) Basalto con textura fluidal y peperítica definida por fragmentos de chert negro (Kbs). Pozo ATD-0210 a 181.10 m. C) Basalto amigdalares cloritizado con pirrotina (Po). Pozo ATD-0216 a 200.00 m. Abreviaturas de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

5.3.2 Chert negro (Kbs)

El contacto de esta unidad con los basaltos es neto (Espinal,2020). Se formó como consecuencia de la silicificación de lutitas con elevado contenido de materia orgánica, y conserva su fisilidad en áreas de silicificación menor. Exhibe fractura concoidea y en determinadas áreas puede ser blanco, característica atribuible al metamorfismo de contacto inducido por la intrusión de diques del terciario (Kelly, 2020). Como característica distintiva, presenta grietas de tensión rellenas de carbonatos (Figura 11.A) y sílice; y es notable la presencia de pirita (Figura 11.B) y pirrotina diseminada, en parches, cúmulos o relleno de fracturas. La dolomitización es una alteración hidrotermal característica (Figura 11.C) y es identificada como la única capa guía mapeable a nivel regional, ya que generalmente suprayace directamente el sulfuro masivo (Pratt, 2014). Los cristales de dolomita exhiben su hábito romboédrico característico (Figura 11.D) y la presencia de pirita puede manifestarse como resultado del reemplazamiento de dichos cristales.

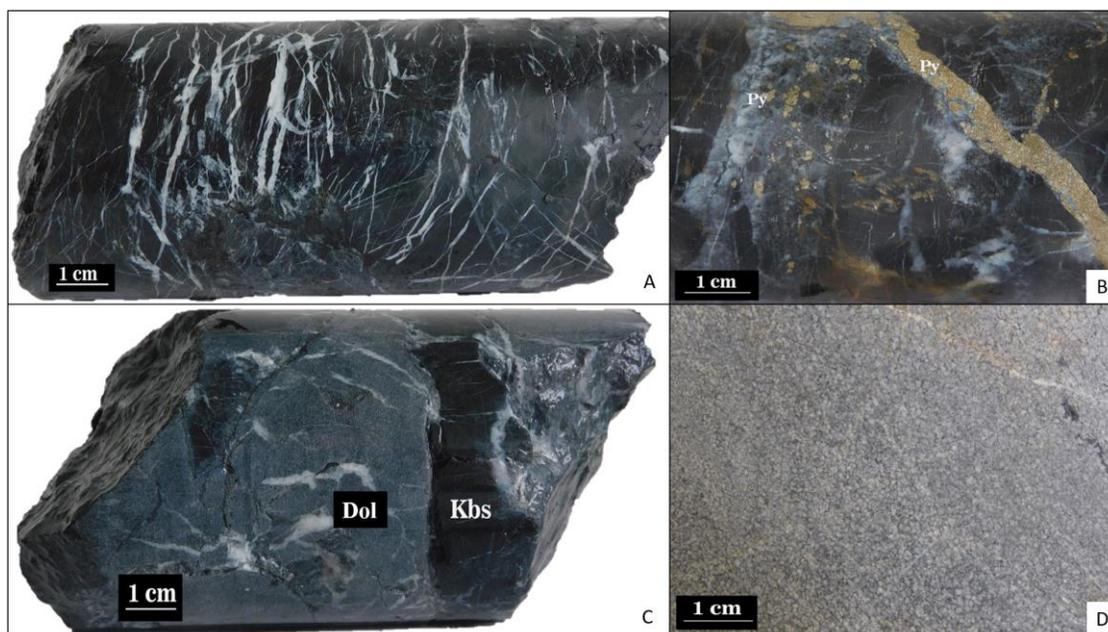


Figura 11. Chert negro (Kbs). A) Chert negro con carbonatos en grietas de tensión. Pozo ATD-0230 a 102.00 m. B) Chert negro con pirita (Py) en venilla y diseminada. Pozo ATD-0230 a 106.90 m. C) Chert negro dolomitizado (Dol) con lente de chert negro (Kbs). Pozo ATD-0214 a 52.70 m. D) Cristales de dolomita producto de alteración hidrotermal en el chert negro. Pozo ATD-0214 a 52.70 m. Abreviaturas de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

5.3.3 Sulfuro masivo (SM)

Esta unidad comprende tanto el sulfuro masivo (>50% sulfuros) (Figura 12A) como el sulfuro semimasivo (25%-50% sulfuros) (Figura 12B) y su mineralización consiste principalmente de agregados de pirita, calcopirita, pirrotina y magnetita, esta última asociada probablemente a la presencia de fuentes termales de mayor temperatura (Espinal, 2020). Se hospeda en el chert negro.

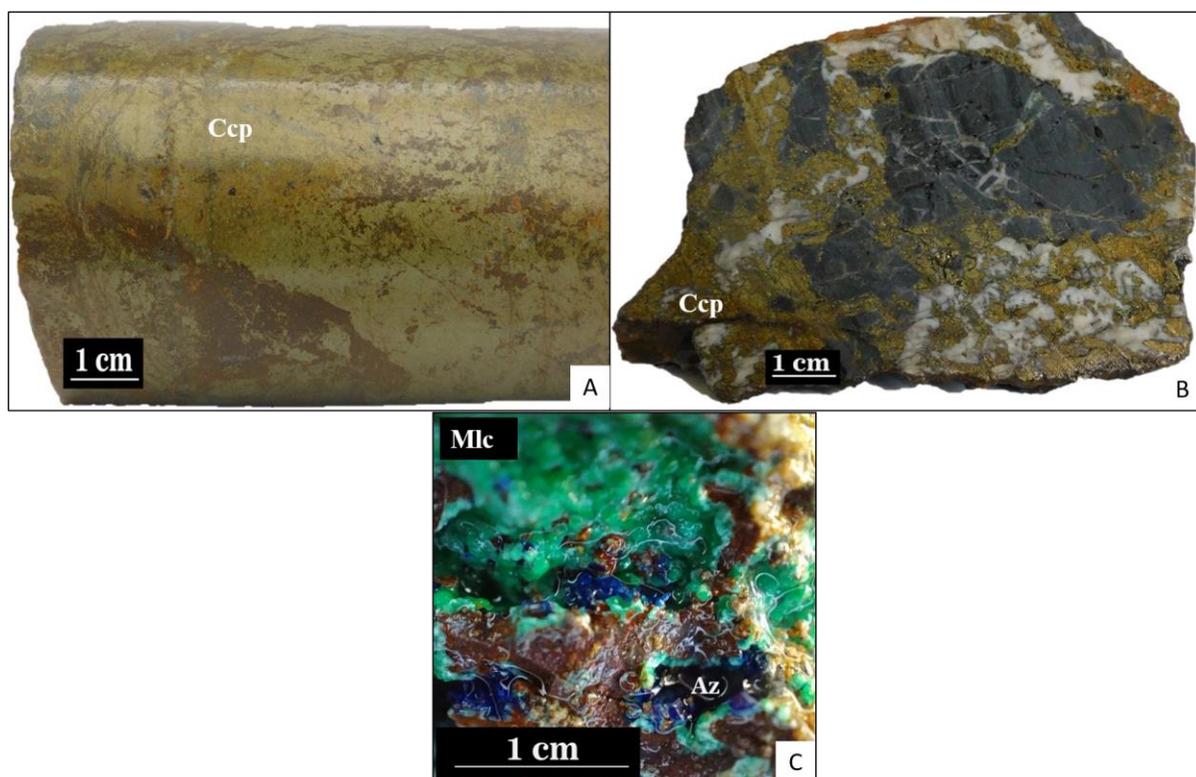


Figura 12. Sulfuro masivo (SM). A) Sulfuro masivo de calcopirita (Ccp). Pozo ATD-0227 a 78.40 m. B) Sulfuro semi-masivo de calcopirita (Ccp). Muestra de mano. C) Azurita (Az) y malaquita (Mlc). Muestra de mano. Abreviaturas de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

5.3.4 Chert gris (Kgc)

Ascendiendo estratigráficamente exhibe tonalidades que van desde marrón oscuro hasta gris claro con variaciones locales en tonos verdes y crema (Figura 13B). En algunas capas se encuentra laminado exhibiendo un patrón tipo ‘cebra’ (Kelly, 2020) (Figura 13A); y presenta

predominantemente pirita en cúmulos (Figura 13C) y en menor proporción pirrotina. Puede encontrarse localmente bioturbado con icnofósiles de *Chondrites* y *Diplocraterion*, y Pratt (2014) la propone como una capa guía para la exploración.

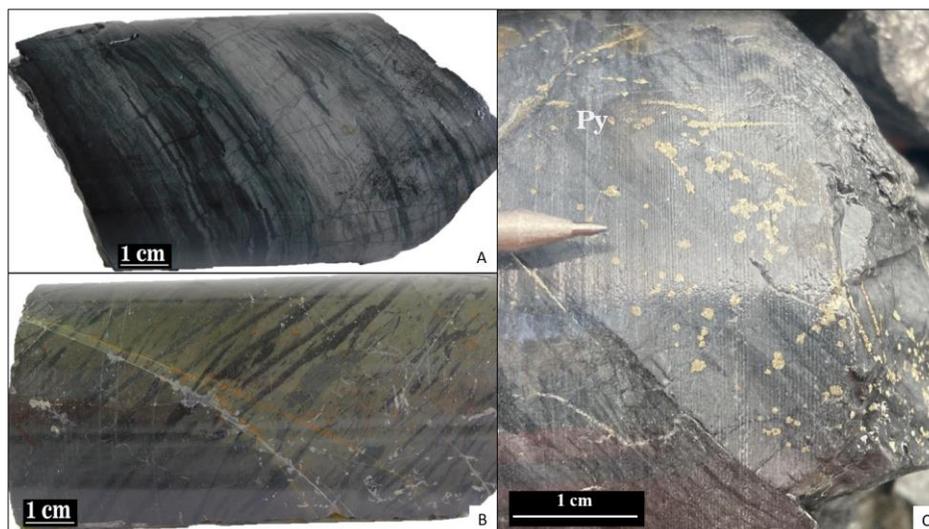


Figura 13. Chert gris (Kgc). A) Chert gris laminado. Pozo ATD-0210 a 146.00 m. B) Chert gris (marrón) laminado. Pozo ATD-0210 a 150.90 m. C) Pirita (Py) en cúmulos y vetillas en chert gris. Muestra de mano. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

5.3.5 Rocas sedimentarias (Kss)

Esta unidad se compone de secuencias turbidíticas incompletas (Espinal, 2020) conformadas por limolitas grises y areniscas de tamaño de grano de fino a grueso (Figura 14) con cristales subangulares a redondeados y proporciones variables de cuarzo y líticos ígneos. Generalmente contienen pirita y pirrotina diseminada.

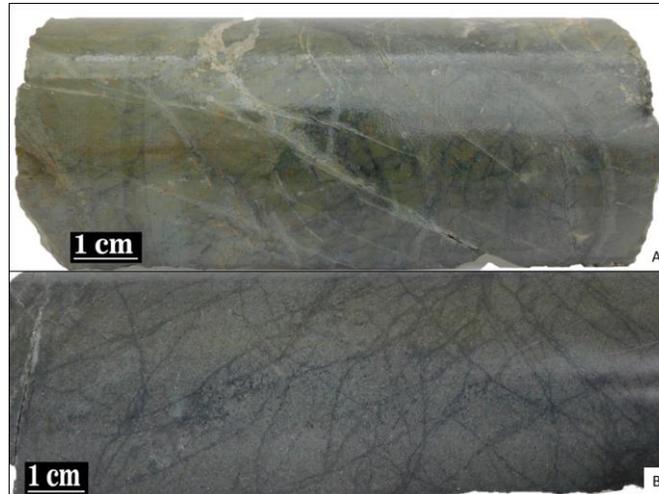


Figura 14. Rocas sedimentarias (Kss). A) Limolita con carbonatos relleno de fracturas. Pozo ATD-0210 a 71.20 m. B) Arenisca de tamaño de grano fino con venillas de materia orgánica. Pozo ATD-0215 a 24.30 m.

5.3.7 Brecha hidrotermal (HBx)

Se compone de fragmentos angulares de chert negro, cementado en una matriz predominantemente silíceica y con carbonatos en menor proporción (Figura 15).



Figura 15. Brecha hidrotermal (HBx). Fragmentos de chert negro (Kbs) cementados en una matriz silíceica. Pozo ATD-0247 a 28.90 m.

5.3.8 Intrusivos (Int)

La secuencia estratigráfica es intruida por dique de texturas y composiciones variables, los cuales suelen tener mineralización de pirita y pirrotina en proporciones de hasta 5%. Estos se encuentran frecuentemente obliterados, por lo que su definición es compleja. Según el Atlas Litológico realizado por el Equipo de Exploraciones de Miner S.A, estos cuerpos ígneos se clasifican en 5 grupos según su composición mineralógica y características texturales (Figura 16):

- Intrusivo 1: roca de carácter subvolcánico que oscila entre andesitas y dacitas, con fenocristales de hornblenda, plagioclasa y cuarzo. Los cristales de hornblenda presentan cloritización moderada.
- Intrusivo 2: Roca subvolcánica amigdaloidal con vesículas rellenas de carbonatos. Suele tener alteración clorítica pervasiva.
- Intrusivo 3: Cuarzodiorita constituida por cristales menores a 5 mm de cuarzo, anfíbol y plagioclasa. Presenta cloritización leve en minerales máficos.
- Intrusivo 4: Diorita de textura porfírica. Frecuentemente contiene xenolitos de basaltos.
- Intrusivo 5: Roca gabroide con cristales hornblenda, plagioclasa y en menor proporción biotita y cuarzo. Presenta cloritización en los minerales máficos.

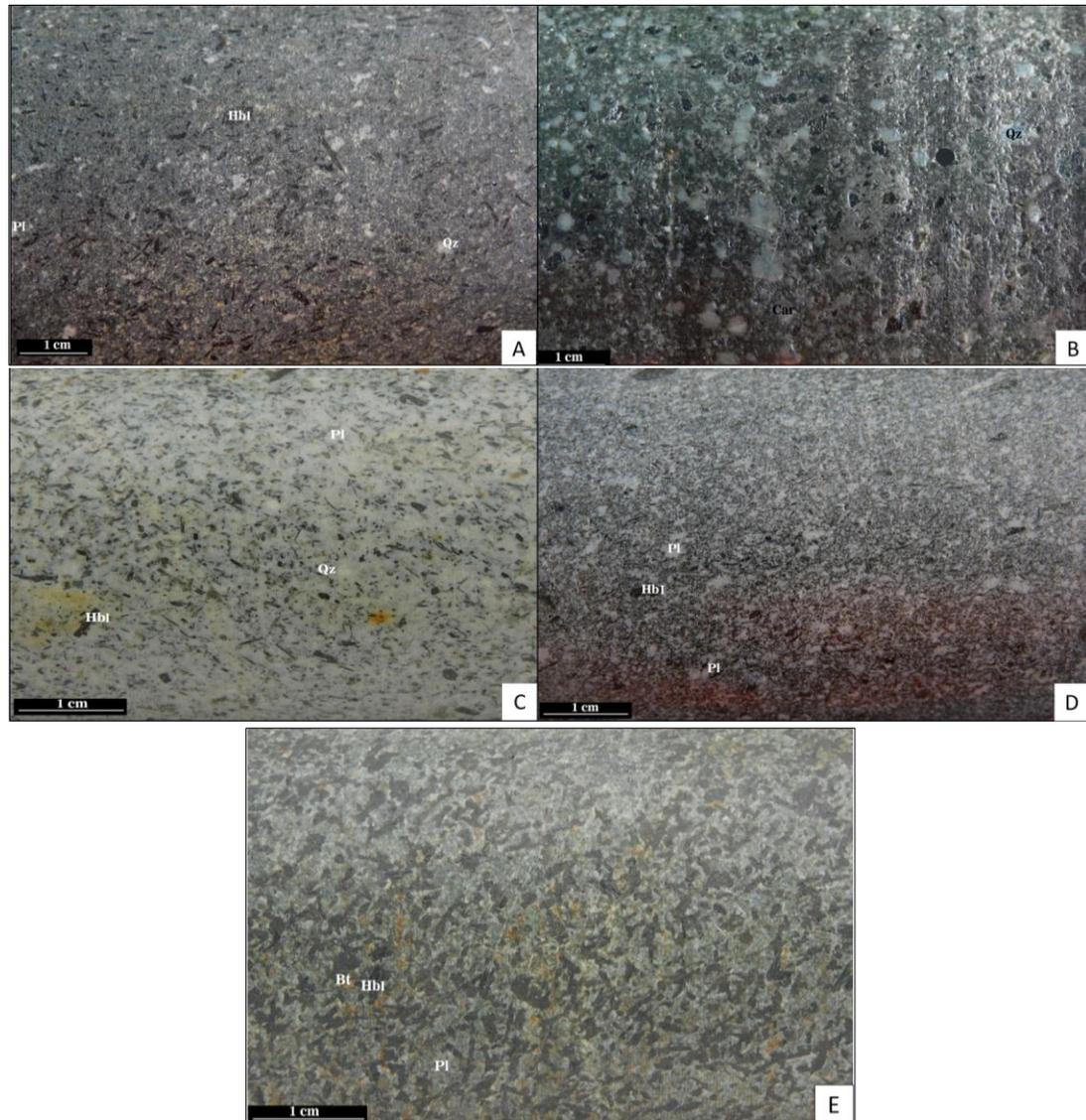


Figura 16. Intrusivos (Int). A) Intrusivo 1. Pozo ATD-0108 a 21.10m. B) Intrusivo 2. Pozo ATD-0108 a 248.95m. C) Intrusivo 3. Pozo ATC-0083 a 291.00 m. D) Intrusivo 4. Pozo ATD-0123 a 372.69 m. E) Intrusivo 5. ATD-0095 a 24.70m. Hbl= Hornblenda; Pl=Plagioclasa; Qz=Cuarzo; Bt=Biotita. Abreviaturas de nombres minerales tomada de Whitney & Evans (2010).

5.3.9 Antrópico (Ant)

No es propiamente una unidad litológica, pero este término se usa para referirse a la mezcla heterogénea que se obtiene al perforar pilares de sostenimiento o material de colapso en interior mina. Se compone de fragmentos angulares clasto-soportados de rocas ígneas, basalto, rocas sedimentarias, chert y sulfuro masivo (Figura 17) embebidos en una matriz arcillosa que suele

perderse en la perforación por la recirculación de agua. Además, la exposición subárea genera oxidación, lo que le confiere tonalidades rojizas.



Figura 17. Antrópico (Ant). A) Recuperación de 2.40 metros de relleno antrópico. Pozo ATD-0227 entre 0.00 m y 02.40 m. B) Zoom de A en 01.60 m. Mezcla de fragmentos de intrusivo (Int), chert gris (Kgc), basalto (Kv) y brecha hidrotermal (HBx).

5.4 Geología estructural local

El sulfuro masivo volcanogénico de El Roble se ubica en la Cordillera Occidental, por lo que se relaciona directamente con los procesos de deformación producto de la subducción de la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana (Fandiño, 2020).

Por tanto, el sulfuro masivo y las unidades litológicas adyacentes a este presentan un control estructural muy importante, evidenciado en el basculamiento de la secuencia volcano-sedimentaria la cual se inclina hacia el este con ángulos mayores a 70° (indicando una compresión subhorizontal); además presenta intensa deformación que ha formado pliegues y otras estructuras de cizallamiento a lo largo de la secuencia estratigráfica (Figura 18), las cuales se presentan principalmente en la zona de influencia de la falla regional La Mansa. Las estructuras producto de dicha deformación son más intensas en los contactos sedimentos/basalto y sedimentos/sulfuro masivo, debido a la anisotropía reológica de dichas zonas (Espinal, 2020).



Figura 18. Estructura tipo dúplex en contacto SM – Kbs. Tomado de Espinal (2020).

En general, la secuencia estratigráfica de El Roble tiene un estilo de plegamiento disarmónico que conforma el sistema de pliegues isoclinales a nivel regional. El plegamiento se concentra en el chert gris, y las rocas sedimentarias más jóvenes se encuentran mínimamente deformadas (Figura 19) (Espinal, 2020).

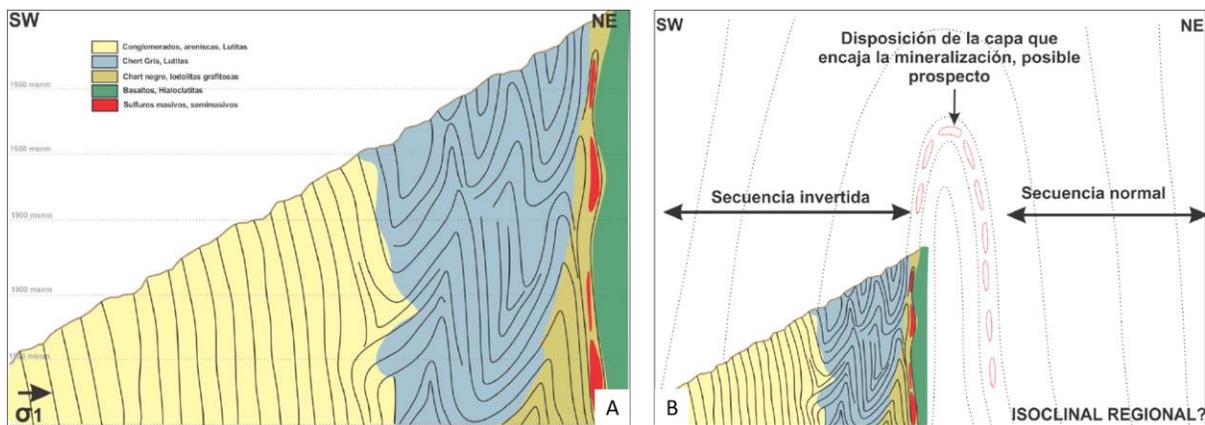


Figura 19. Esquemas idealizados del plegamiento general en la secuencia estratigráfica de la mina El Roble. Tomado de Espinal (2020). A) Sistema de pliegues disarmónico y apretado. La unidad más reciente (oeste) y la más antigua (este) se presentan con deformación menor. El chert gris presenta pliegues cuyos flancos NE y SW son subverticales. B) Sistema regional de pliegues isoclinales propuesto.

5.5 Tipo de depósito

En principio, Ortiz (1988) sugirió que El Roble es un depósito tipo Chipre o máfico, argumentando la similitud de sus características geológicas, químicas y mineralógicas con los depósitos ofiolíticos mencionados. Entre estas similitudes, destacó la mineralización de las rocas aflorantes en el target Santa Anita de El Roble con los sulfuros masivos de Troodos, en Chipre, que se caracteriza por la

presencia de diseminación y venas de piritita, calcopiritita y otros sulfuros. Asimismo, Ortiz señala que la mineralización con estilo enrejado y masivo en El Roble ha sido previamente descrita por Hütchinson & Searle (1971) para los SMV de tipo Chipre, generados en zonas de expansión del suelo oceánico.

Posteriormente, Pratt (2014) sugiere la posibilidad de que El Roble sea un SMV tipo Beshi o pelítico-máfico. Murillo (2020) respalda esta propuesta al destacar las intercalaciones pelítico-máficas observadas en El Roble, que abarcan calizas micríticas con foraminíferos y materia orgánica, limolitas, wackestones, areniscas, flujos de lava con afinidad MORB y capas de basaltos que establecen contactos peperíticos con el chert negro. También argumenta que la columna estratigráfica de El Roble es similar a la que se encuentra en rifts cercanos a los márgenes continentales, donde la actividad de subducción induce tasas elevadas de sedimentación continental, como se observa en el Miembro Urrao compuesto por areniscas y conglomerados. De igual manera, Espinal (2020) menciona que las sucesiones volcano-sedimentarias como las de El Roble, concuerdan con la definición clásica de los depósitos tipo Beshi, los cuales se forman en cuencas backarc y contienen más de 25% de sills máficos, menos de 5% de rocas félsicas y cantidades variables de sedimentos que incluyen areniscas, wackestones y lodolitas (Franklin, 2005).

Sin embargo, el informe técnico más reciente publicado en 2021 por Atico Mining define el depósito SMV de El Roble como máfico, respaldando así la propuesta inicial de Ortiz. De acuerdo con la clasificación de Franklin (2005), los depósitos máficos están asociados a ambientes de dorsal oceánica o cuencas backarc maduras, y están caracterizados por sucesiones ofiolíticas con afinidad toleítica MORB. Estas sucesiones se componen por al menos un 75% de lavas almohadilladas y

basaltos masivos, en menor proporción secuencias sedimentarias que incluyen chert y rocas félsicas en cantidades menores al 1% o totalmente ausentes (Barrie & Hannington, 1999).

6. Metodología

En la práctica académica realizada en el área de Geología en Minera El Roble S.A entre septiembre de 2023 y febrero de 2024, se prestó asistencia en las labores de logeo, muestreo, medición de pozo y modelamiento 3D de varios pozos. En el presente informe se detallan los resultados de estas actividades sobre los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*, todos ellos dirigidos al target de mineralización Cuerpo A, perforados con el objetivo de precisar la distribución, geometría, características mineralógicas y leyes de dicho cuerpo mineralizado.

Como se ilustra en la figura 20, estos pozos se planearon de manera estratégica, de modo que su collar (punto de inicio), azimut, inclinación y longitud (Tabla 3) direccionaran los pozos al target objetivo. Para lograr esto, se tuvieron en consideración los siguientes puntos:

- Ubicación de la máquina de perforación: el collar de los pozos debe tener coordenadas en este, norte y elevación, congruentes con la ubicación de las plataformas de perforación. La plataforma de perforación del pozo *ATD-0199* se ubicaba al este de la plataforma de perforación de los pozos *ATD-0204* y *ATD-0205*, por lo que su collar difiere de estos dos.
- Capacidad operativa: es crucial considerar las características de la máquina de perforación, la reología del macizo rocoso y la presencia de fallas locales o regionales. Considerando estos factores, se planeó la trayectoria de los pozos a través de las zonas más competentes y con una profundidad máxima programada posible de ejecutar para los perforistas.
- Malla de perforación *infill*: se realizó un análisis de los pozos perforados anteriormente, y con base en sus resultados, se priorizaron las zonas pendientes por perforar. Se dio prioridad a las zonas adyacentes a pozos antiguos de los que se obtuvieron leyes de cobre u oro relevantes y aquellas con mayor vacío de información.

- Ubicación relativa del cuerpo mineralizado: los targets de la campaña de exploración brownfield fueron previamente explotados, por lo que existen modelos de estos. Considerando la ubicación y dimensiones del Cuerpo A, se direccionaron los pozos de modo que fuera altamente probable que interceptaran dicho target.

Tabla 3. Survey, profundidad programada y profundidad objetivo de los pozos planeados. Se omite el collar por razones de confidencialidad

Pozo	Azimut (°)	Inclinación (°)	Profundidad programada (m)	Profundidad objetivo (m)
<i>ATD-0199</i>	349,00	-7,50	220,00	155,00
<i>ATD-0204</i>	352,00	-5,00	240,00	200,00
<i>ATD-0205</i>	354,50	-8,50	240,00	200,50

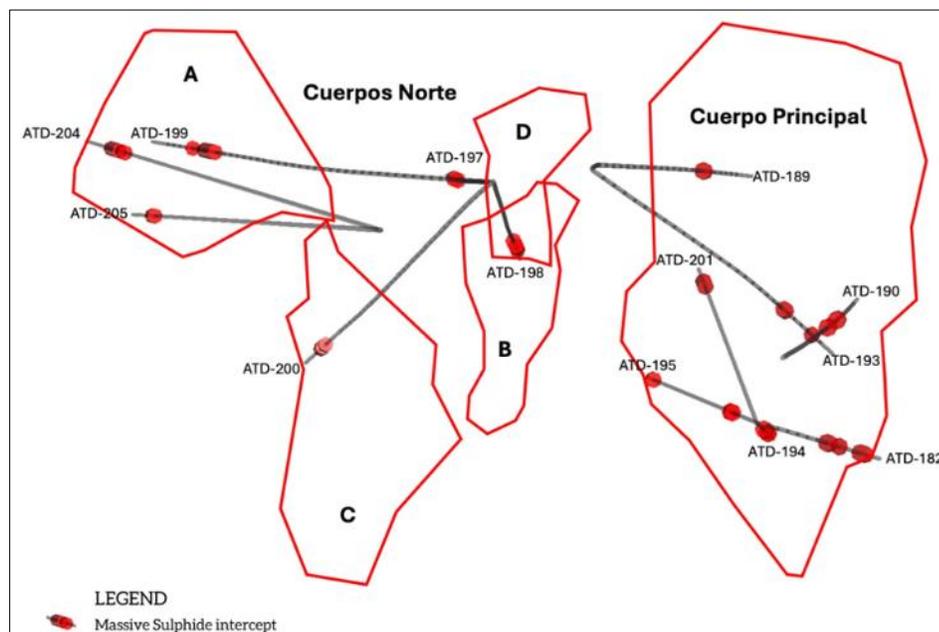


Figura 20. Esquema de los pozos ejecutados. Tomado de Atico Mining, new release (2023).

Posterior a la planeación de estos pozos, el área de Topografía se encargó de la marcación del collar para el anclaje de las máquinas de perforación al macizo rocoso, y luego, se dio inicio a la perforación de los pozos. Las cajas de almacenamiento con los testigos de perforación del día anterior se recibían diariamente en la sala de logeo. Posterior a su recepción, los auxiliares lavaban y fotografiaban dichas cajas, con un tablero en el que indicaban el pozo y el metraje correspondiente

(from/to). Luego, cargaban las fotografías en la base de datos de Google Drive del área de Geología, para posteriormente realizarse el logueo y la caracterización geotécnica, incluido RQD (designación de calidad de roca) y recuperación del núcleo. Por último, se determinaban las secciones de núcleo para muestrear, en función de la litología y mineralización presentes.

Las actividades realizadas, en orden cronológico, se describen a continuación:

6.1 Logueo detallado

El logueo detallado se llevó a cabo mediante la observación directa de los núcleos de perforación, utilizando lupa, rayador de tungsteno, imán, ácido clorhídrico y regla protactor; lo que permitió identificar con precisión la litología, alteraciones, mineralización y estructuras presentes en cada pozo.

- Se realizó la clasificación litológica detallada de cada tipo de roca (Tabla 4), identificando la textura presente (clástica, porfirítica, afanítica, criptocristalina, etc.) y su tamaño de grano. Esta información es fundamental para afinar el modelo litológico existente.
- Se establecieron los tramos con presencia de alteraciones hidrotermales y se caracterizó el tipo e intensidad de las mismas.
- Se describió la mineralización presente, teniendo en cuenta su estilo y el tamaño y forma de los cristales. Posteriormente, se cuantificó su abundancia relativa en porcentaje.
- Se definió el tipo de estructuras que evidenciaban deformación dúctil o frágil. Esta información es de gran utilidad para programar futuros pozos de manera estratégica, evitando aquellas zonas con mayor deformación.

Tabla 4. Códigos y colores para la clasificación de litología mayor y menor.

Litología mayor	Código	Color	Litología menor	Código	Color
Antrópico	Ant		Relleno detrítico	Adf	
			Colapso	Ac	
Cuaternario	Q		Deposito aluvial	Qal	
			Deposito coluvial	Qc	
Rocas sedimentarias	Kss		Caliza	Kcz	
			Arcillolita	Ksc	
			Limolita	Klm	
			Grauvaca	Kgrw	
			Turbiditas	Kstd	
			Areniscas	Ksds	
			Conglomerados	Kcng	
Chert gris	Kgc		Chert gris laminado	Kcl	
			Chert gris	Kcl	
Sulfuro masivo	MS		Sulfuro masivo	MS	
			Sulfuro semimasivo	SMS	
Chert negro	Kbs		Chert	Kbc	
Basalto	Kv		Diabasa	KvDb	
			Lava almohadillada	Kvp	
			Hialoclastita	KvHc	
			Basalto amigdalar	KvA	
			Basalto fluidal brechado	KvBf	
			Basalto brechado	KvBx	
Brecha hidrotermal	HBx		Brecha hidrotermal 1	HBx1	
Intrusivo	Int		Intrusivo 1	Int1	
			Intrusivo 2	Int2	
			Intrusivo 3	Int3	
			Intrusivo 4	Int4	
			Intrusivo 5	Int5	
Sin recuperación de núcleo	No_Core		No core	No_Core	

6.2 Muestreo de núcleos de perforación

Posterior a la finalización de los pozos, se realizó el muestreo de los tramos de interés para enviar al laboratorio ALS Chemex, donde se realizaron las pruebas de análisis multielemental y de densidad, con el objetivo de determinar las leyes y el tonelaje del Cuerpo A.

6.2.1 Muestreo para análisis multielemental

Los tramos de muestreo se determinaron considerando la longitud e intensidad de la mineralización. Se marcaron aquellos intervalos de al menos 60 centímetros con proporciones relativas de sulfuros de más del 10%. Por regla del laboratorio, ninguna muestra podía ser mayor a 200 centímetros de longitud e internamente se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- No se mezclaron unidades litológicas en una misma muestra, debido a que cada unidad tiene características mineralógicas y químicas distintas, por lo que mezclarlas puede generar sesgos en las interpretaciones al incumplir con el principio de representatividad.
- Se muestreó el intercepto de cada pozo, delimitando muestras diferentes según los cambios mineralógicos definidos por la variación del tipo y concentración de los minerales presentes. Por ejemplo, la variación local del sulfuro masivo de pirita a sulfuro semimasivo de calcopirita marcó el cambio de muestra. Lo anterior, para evitar la dilución de las leyes.
- Se muestreó por los menos dos metros antes y después del intercepto. Sin embargo, esta no es una norma fija, ya que, en caso de tener mineralización importante en tramos mayores a dos metros, se muestrearon también.

Considerando los criterios anteriores, se marcaron los tramos de muestreo en la caja de almacenamiento de testigos, indicando el inicio y fin de cada muestra. En el caso de núcleos enteros y compactos, los auxiliares de muestreo dividieron estos en dos mitades, cortándolos longitudinalmente con una sierra diamantada; y en caso contrario de ser roca triturada, con la ayuda de una cuchara plástica realizaron el cuarteo de la muestra. En ambos casos, se envió al laboratorio la mitad de la muestra (excepto en el caso de muestras duplicadas, explicado a continuación) y se conservó la otra mitad en la caja de almacenamiento, en su posición y orientación original.

A cada muestra se le asignó un código según el consecutivo de un talonario de muestreo. Basándose en ese consecutivo, se imprimieron cuatros tiquetes para cada muestra: dos con el código, la información del metraje (desde y hasta que metraje se tomó) y el tipo de muestra (core o control) los cuales se adhirieron, uno a la caja de almacenamiento en el punto donde inicia la muestra y otro en el talonario de muestreo (Figuras 21A, 21C); y los otros dos tiquetes, solo con el número y tipo de muestra, se adhirieron a la bolsa de polietileno donde se dispuso el material para ser enviado al laboratorio (Figura 21B).



Figura 21. Método de muestreo de núcleos de perforación. Muestra ATDH-30683 del pozo *ATD-0205*. From: 208.70 m to:209.70 m. A) Tiquete en talonario de muestreo. B) Ejemplo de embalaje de una muestra. C) Tiquete en la caja de almacenamiento, la línea roja indica el principio de la muestra.

Posterior al muestreo, se realizó la inserción de muestras de control como parte del programa QA/QC (garantía y control de calidad) para asegurar el cumplimiento de los protocolos llevados a cabo en el laboratorio, el muestreo y el corte. Se tuvieron en cuenta las siguientes pautas:

- La inserción de muestras de control se realizó en cada lote de manera individual. Por esto, la primera muestra de todos los lotes fue un blanco, definido como una muestra con

ausencia de contenido metálico utilizado para medir la contaminación durante los procesos de preparación y análisis de la muestra.

- Se insertó un segundo blanco después de las zonas mineralizada, para verificar que no existiera contaminación cruzada.
- Se insertó una muestra estándar, que consiste en una pulpa con concentración de elementos químicos conocida. Esto permitió comprobar la exactitud de los resultados, ya que verifica si el laboratorio está realizando el tratamiento adecuado de las muestras con base a su contenido de sulfuros, por lo que, en caso de insertarse en una zona mineralizada de alta ley, el estándar también debe serlo.
- Se realizaron muestras duplicadas en zonas mineralizadas. El objetivo de estas, es medir la precisión de los resultados bajo la premisa de que se está analizado la misma muestra (o una muy similar) con el mismo método que la original. Esto permitió identificar si la preparación de la muestra, en especial el corte y el cuarteo, se realizó correctamente. Para obtener dicho control, los auxiliares cortaron la mitad de la mitad obtenida del corte longitudinal inicial. En caso de que la muestra estuviera triturada, con ayuda de una espátula se realizó la homogenización y el cuarteo de la misma.

Las muestras se enviaron hasta las instalaciones de ALS Chemex en Medellín, y allí se realizó el proceso de preparación de las pulpas: secado, triturado y pulverizado. Posteriormente, analizaron los elementos de interés: el cobre, la plata y el zinc se analizaron mediante el método de digestión de cuatro ácidos (HNO_3 , HCl , HF y H_2SO_4) seguido de espectrometría de absorción atómica (AAS). El oro se analizó por el método de plasma acoplado inducido (ICP), seguido de espectrometría de emisión atómica (AES); los elementos traza se analizaron con ICP y análisis de

espectrómetro de masas (MS) que utilizo cuatro ácidos para digerir la muestra; y las trazas de mercurio se analizaron con digestión de agua regia y el vapor frío fue analizado por métodos AES.

6.2.2 Muestreo para obtención de la densidad

A partir del modelo tridimensional del Cuerpo A, se puede obtener una estimación aproximada de su volumen, y al determinar su densidad es factible calcular el tonelaje. Bajo esta premisa, se realizó el muestreo para la obtención de la densidad en los tres pozos.

El objetivo fue enviar al menos una muestra por pozo al laboratorio ALS Chemex, que utiliza el método de la parafina. Este consiste en recubrir la muestra del núcleo con cera de parafina, medir el peso de la muestra en aire, luego suspender la muestra en agua y medir el peso nuevamente. ALS exige para este ensayo que las muestras pesen al menos 300 gramos y no contengan fracturas, ni fisuras.

Sin embargo, esto no siempre es posible, por lo que en los casos en que ninguna muestra cumplió con estos estándares, se enviaron al laboratorio interno de Miner S.A, cuya única condición es que las muestras pesen al menos 200 gramos. Aunque en el laboratorio interno de Miner no utilizan el método de la parafina, en ambos casos las pruebas se sustentan en el principio de Arquímedes: “cuando un cuerpo está total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desplaza”.

6.3 Medición de desviación de pozo

Tal como se mostró en la tabla 3, los pozos se planifican con un *survey* (azimut e inclinación) definido. Sin embargo, zonas incompetentes o maniobras inadecuadas por parte de los perforistas pueden ocasionar desviaciones en la perforación.

Por esta razón, una vez concluidos los pozos, se llevó a cabo la medición de estos utilizando el giroscopio GyroMaster™ de Stockholm Precision Tools (Figura 22.A), el cual proporciona una medición continua de la variación del azimut y la inclinación. Este equipo contiene un GPS integrado y un cuenta metros, ambos vinculados a un dispositivo móvil que registra y guarda la información de la medición.

Para realizar dicha medición, se solicitó al perforista insertar el giroscopio en la tubería interna y asegurarlo con la guaya eléctrica o *wireline*, de modo que el cuenta metros del equipo registró el recorrido del giroscopio (Figura 22.B). Posteriormente, se indicó el azimut de comienzo (dependiendo el pozo que se estaba midiendo) en el dispositivo móvil, y se inició la medición descendiendo el giroscopio a través del pozo. En el dispositivo móvil se registró la distancia recorrida por el equipo, el cual indica periodos donde se debe pausar el movimiento para la estabilización de los sensores. Durante el descenso del giroscopio, este mide de manera continua el azimut e inclinación del pozo.

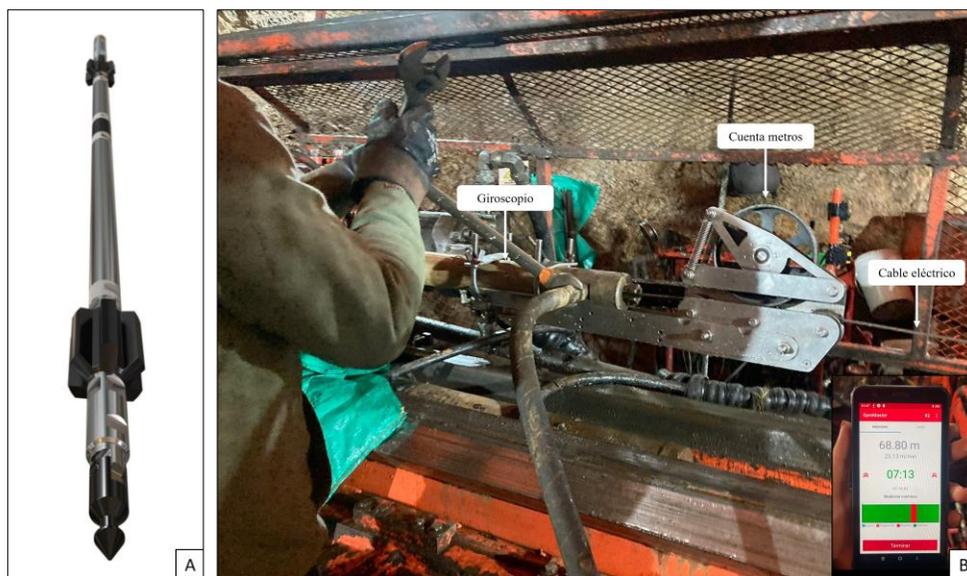


Figura 22. Medición de pozo. A) Gyromaster. B) Medición del pozo *ATD-0205*. En la esquina inferior derecha, el dispositivo móvil marcando los metros recorridos y la velocidad de descenso del equipo.

Al finalizar la medición, se realiza la descarga de los datos de medición.

Los resultados de los apartados descritos anteriormente se consignaron en la plataforma Mx Deposit.

6.4 Modelamiento e interpretación de secciones y columnas estratigráficas

Se realizó el modelamiento en tres dimensiones de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*, utilizando la información recopilada en los puntos anteriores (litología, mineralización, estructuras y *survey*) en el software de modelamiento 3D Leapfrog Geo. Para los tres pozos se generaron secciones y columnas estratigráfica, con el objetivo de comprender mejor la distribución de la mineralización e interpretar las características geológicas del cuerpo mineralizado.

7. Resultados

7.1 Logueo detallado

En este capítulo se detallan las litologías identificadas en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* incluyendo información sobre el tipo, estilo e intensidad de mineralización presente. Además, se examinan las estructuras que sugieren la influencia de fallas y los contactos entre las diferentes unidades litológicas.

7.1.1 Litología

7.1.1.1 Cuaternario (Q)

En los tres pozos esta litología se encuentra como depósitos coluviales, producto de la erosión de los macizos rocoso a lo largo de laderas y su posterior depositación en bajos topográficos. En el pozo *ATD-0199*, se identifican fragmentos clasto-soportados de arenisca, mientras que en los pozos *ATD-0204* (Figura 23) y *ATD-0205*, la litología consiste en fragmentos matriz soportados de chert gris. En todos los casos, la matriz de estos depósitos es limoarcillosa y muestra tonalidades rojizas, indicativas de procesos de meteorización química que dieron lugar a la formación de óxidos de hierro.



Figura 23. *ATD-0204*. Depósito coluvial. Compuesto por fragmentos angulares de tamaño guijarro (4-64mm) de chert gris en matriz limoarcillosa. Profundidad: 0.00 m a 5.60 m. Rocas sedimentarias (Kss)

Esta unidad litológica comprende en los tres pozos, arenisca media a gruesa principalmente, conformada por cristales de cuarzo y líticos sedimentarios con mineralización de pirrotina y en menor proporción pirita diseminada o en parches. También se registran lodolitas laminadas, arcillolitas y conglomerados, cuya la intercalación se interpreta como secuencias turbidíticas incompletas (Figura 24). Es frecuente observar en estas litologías vetillas de cuarzo (Figura 24.C) y carbonatos, además de silicificación leve.

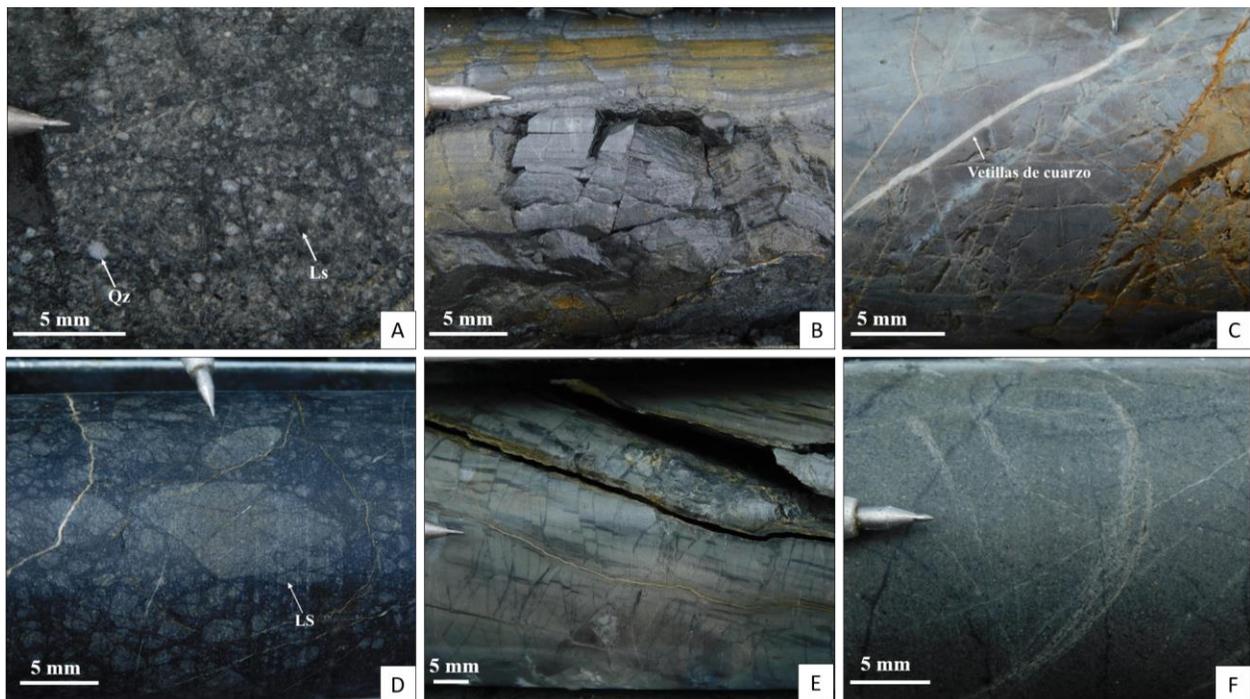


Figura 24. Rocas sedimentarias en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Arenisca muy gruesa, mal seleccionada, con clastos redondeados de líticos sedimentarios (Ls) y cuarzo (Qz). Profundidad: 89.00 m. B) *ATD-0199*. Lutita fisil con laminación de materia orgánica. Profundidad: 124.80 m. C) *ATD-0204*. Arcillolita sin estructuras con vetilla de cuarzo. Profundidad: 108.10 m. D) *ATD-0204*. Conglomerado matriz soportado con líticos sedimentarios redondeados a subredondeado de arenisca media. Profundidad: 15.50 m. E) *ATD-0205*. Lodolita gris laminada con fisilidad. Profundidad: 158.60 m. F) *ATD-0205*. Arenisca media. Profundidad: 118.70 m. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.1.2 Chert gris (Kgc)

Esta unidad está compuesta predominantemente por lodolitas con silicificación intensa de tonalidades grisáceas, aunque se observan variaciones locales que van desde tonos verdes hasta

marrones. Se interestratifica con la unidad de rocas sedimentarias (Kss) y se caracteriza por presentar laminación frecuente (Figura 25.A) y ocasionalmente está afectado por fallas post-depositacionales de escala centimétrica (Figura 25.C). A pesar de que comúnmente contiene mineralización de hasta un 5% de pirita (observado en otros pozos), en los pozos a desarrollar en este informe la mineralización es prácticamente insignificante, manifestándose en algunas zonas locales con pirita diseminada en proporciones menores a 0.5%. Ocasionalmente contiene bioturbación (Figura 25.B).

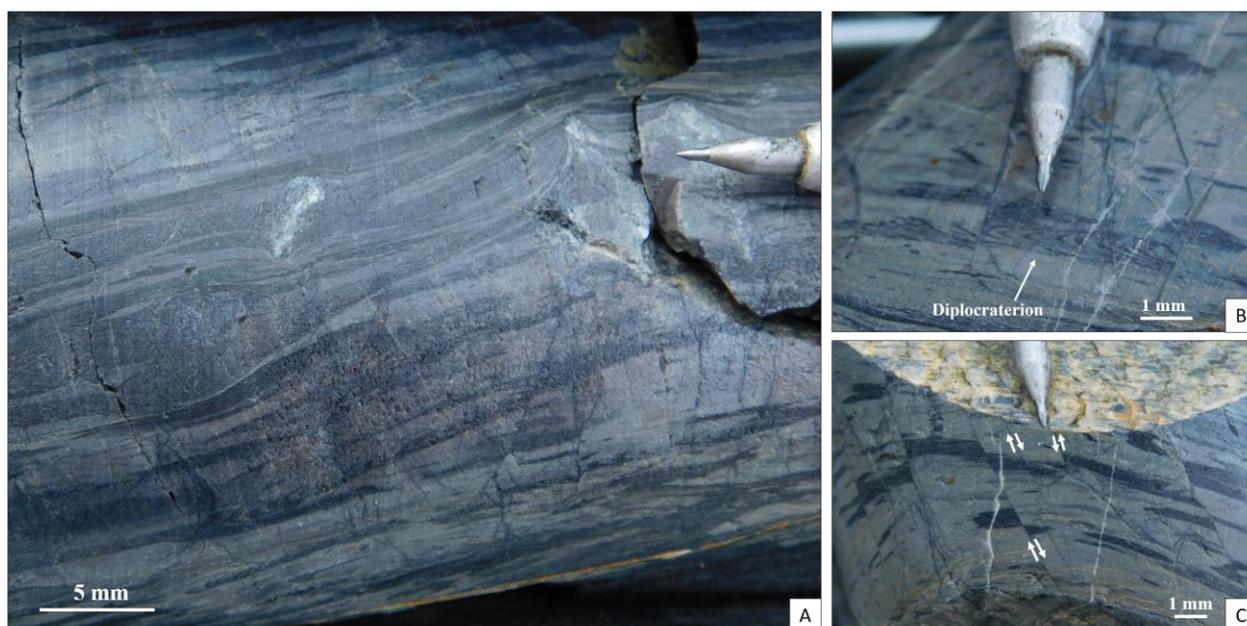


Figura 25. Chert gris en los pozos *ATD-0199* y *ATD-0204*. A) *ATD-0199*. Chert gris con láminas de materia orgánica deformadas. Profundidad: 146.80 m. B) *ATD-0204*. Chert gris con bioturbación, según Pratt (2014) Diplocraterion. Profundidad: 144.40 m. C) *ATD-0204*. Chert gris laminado con fallas postdepositacionales inversas y normales. Profundidad: 162.00 m.

7.1.1.3 Chert negro (Kbs)

Esta unidad exhibe homogeneidad tanto en textura como en composición a lo largo de los tres pozos. Se manifiesta como un shale fuertemente silicificado, caracterizado por grietas perpendiculares a la laminación que han sido rellenadas con carbonatos o sílice (grietas de tensión)

(Figura 26). En términos de mineralización, se observa la presencia de pirita diseminada y rellenando fracturas discontinuas.

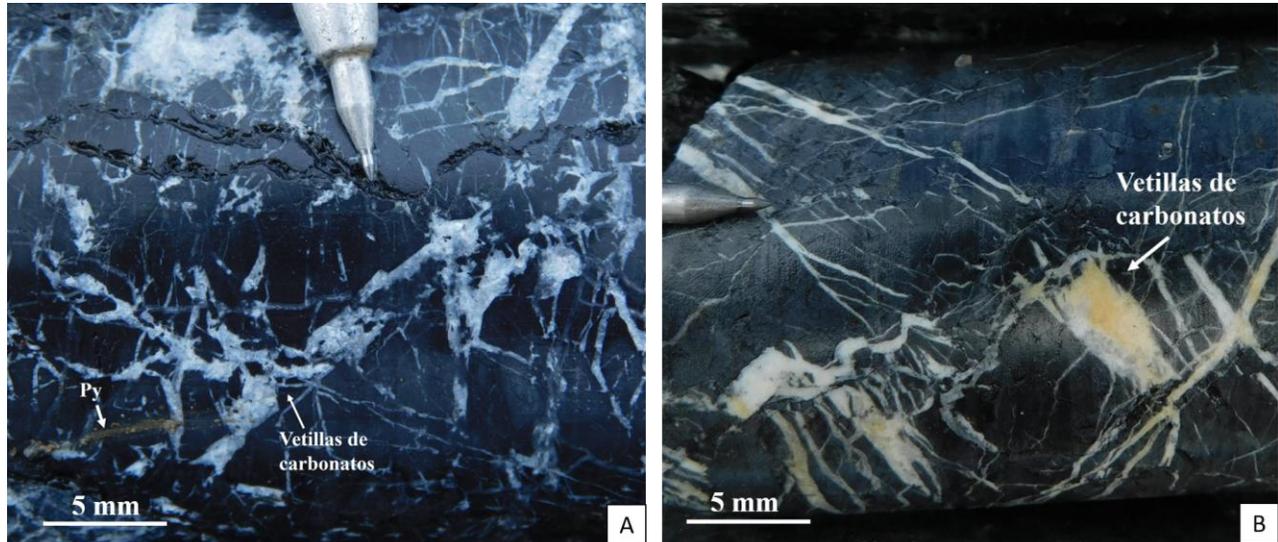


Figura 26. Chert negro en los pozos *ATD-0199* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Profundidad: 156.40 m. B) *ATD-0205*. Profundidad: 215.70 m. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.1.4 Sulfuro masivo (SM)

Para éxito de la campaña, los tres pozos interceptaron sulfuro masivo. Este se encuentra hospedado en el chert negro y muestra una variación esporádica y constante a sulfuro semimasivo (SMS) el cual está cementado por una matriz silíceea. La composición de la mineralización está mayormente constituida por pirita con hábitos subhedrales a euhedrales y calcopirita en agregados masivos. En menor proporción se observa la presencia de pirrotina y de manera local se encuentra jaspe rojo asociado al sulfuro semimasivo (Figura 27).

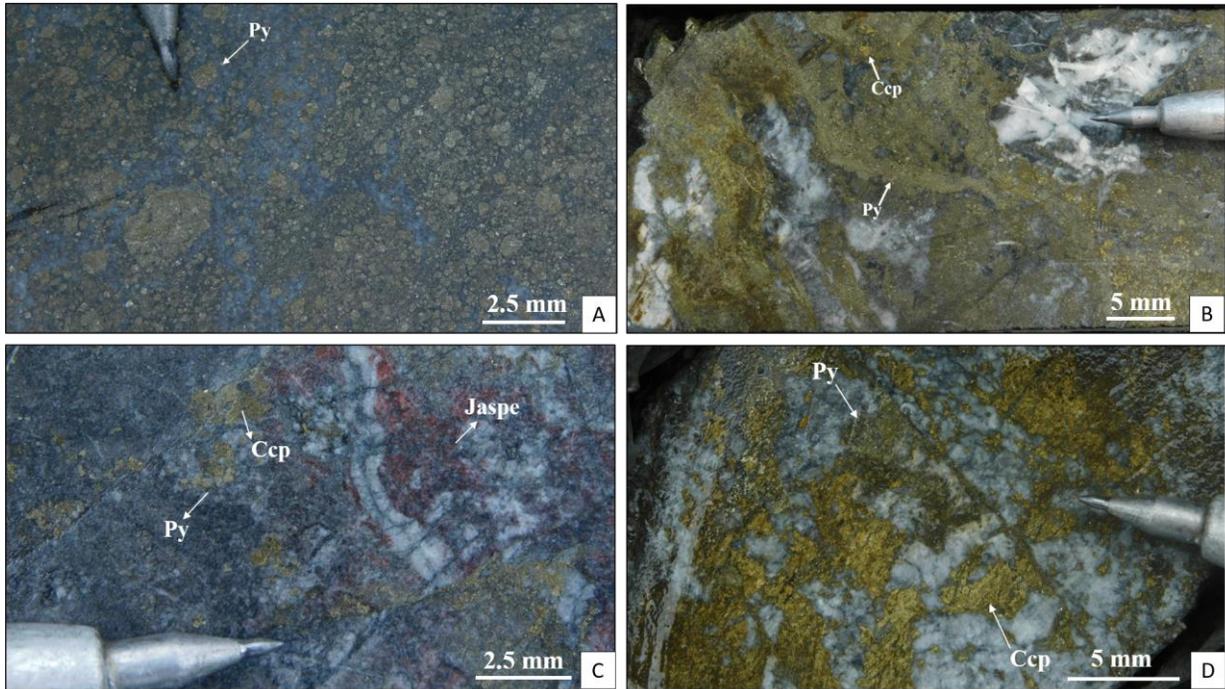


Figura 27. Sulfuro masivo en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Sulfuro semimasivo de pirita (75%). Profundidad: 171.80 m. B) *ATD-0204*. Sulfuro masivo de pirita (60%) y calcopirita (10%). Profundidad: 199.40 m. C) *ATD-0204*. Sulfuro semimasivo de pirita (15%) con jaspe y calcopirita (10%). Profundidad: 204.10 m. D) *ATD-0205*. Sulfuro semimasivo de calcopirita (40%) y pirita (5%). Profundidad: 207.30 m. Ccp= calcopirita; Py = pirita. Abreviatura de nombres minerales tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.1.5 Basaltos (Kv)

Esta litología, recuperada en la mayor profundidad de los tres pozos, se caracteriza típicamente por una textura amigdalal rellena predominantemente de clorita (Figura 28.B y Figura 28.C) y en menor medida de carbonatos. Las peperitas (Figura 28.A), aunque menos comunes, presentan tonalidades verdes debido a una intensa alteración clorítica. Aunque en otros pozos se ha observado la presencia de pirrotina diseminada, en los pozos descritos aquí no se observa ninguna mineralización.

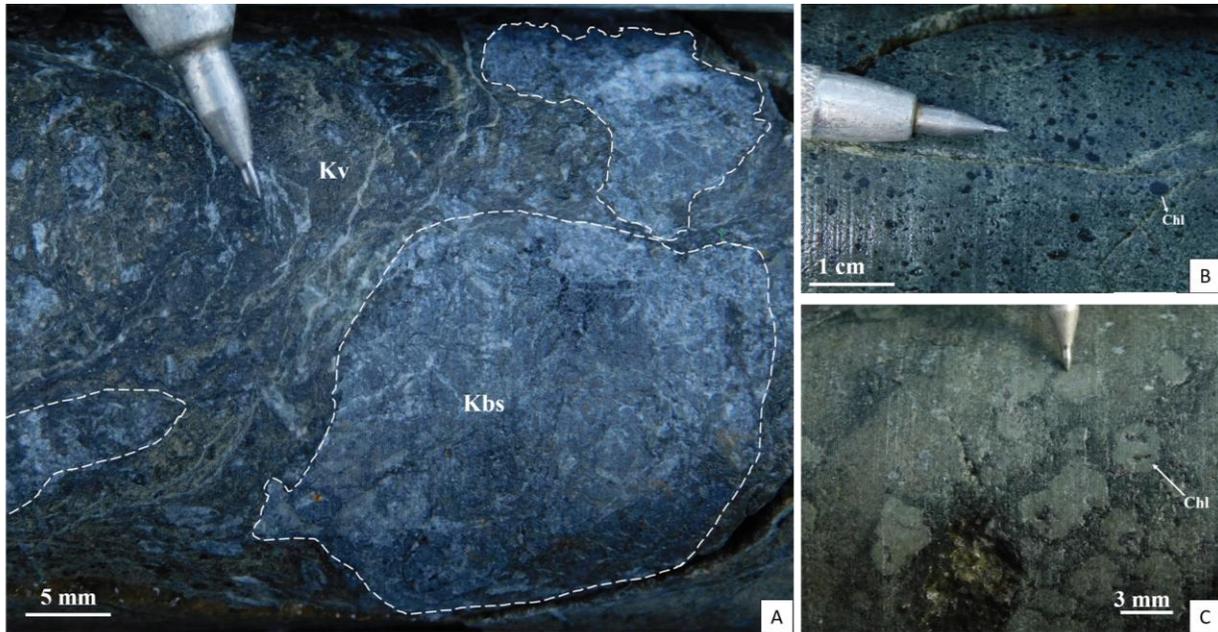


Figura 28. Basalto en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Basalto con textura peperítica. (Kv = basalto, Kbs = chert negro). Profundidad: 218.50 m. B) *ATD-0204*. Basalto cloritizado con amígdalas rellenas de clorita (Chl). Profundidad: 223.00 m. C) *ATD-0205*. Basalto cloritizado con carbonatos en amígdalas. Profundidad: 236.60 m. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.1.6 Intrusivos (Int)

Los intrusivos tienen variedad composicionales y texturas (Figura 29), sin embargo, en los pozos al menos el 80% de los intrusivos presentes tienen alteración sericitica/filica, la cual ha obliterado la textura original de la roca, situación que dificulta la clasificación de la misma.

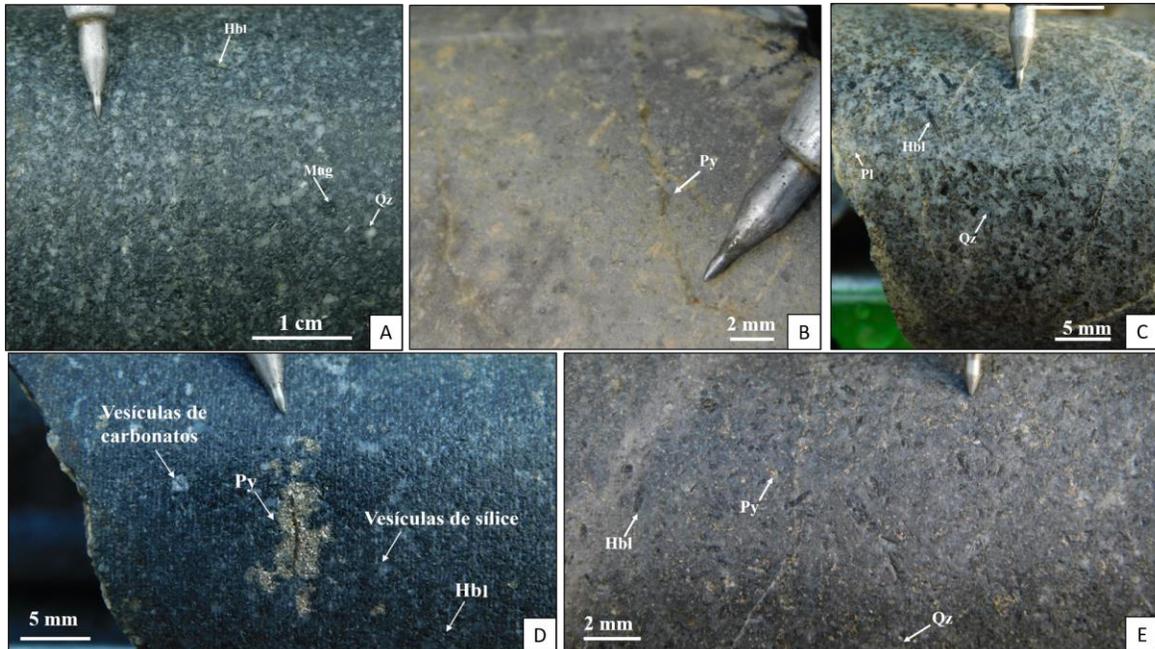


Figura 29. Intrusivos en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Intrusivo 5 (diorita). Roca compuesta por hornblenda (Hbl) cuarzo (Qz) y magnetita (Mag). Profundidad:173.15 m. B) *ATD-0199*. Intrusivo completamente obliterado por alteración filica. Contiene pirita (Py) en stringers. Profundidad:191.60 m. C) *ATD-0204*. Intrusivo 4 (gabro). Roca de textura porfiritica con hornblenda (Hbl) y plagioclasa (Pl) predominantemente y cantidades casi insignificantes de cuarzo (Qz). Profundidad: 165.95 m. D) *ATD-0204*. Intrusivo 2. Roca subvolcánica de textura amigdalal con vesículas rellenas de carbonatos, sílice y fenocristales de hornblenda (Hbl). Profundidad: 162.60 m. E) *ATD-0205*. Intrusivo porfiritico con fenocristales de hornblenda (Hbl) y cuarzo (Qz) en matriz alterada. Contiene pirita (Py) diseminada. Profundidad: 150.15 m. Abreviatura de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

7.1.1.7 Brecha hidrotermal (HBx)

Se intercepta un tramo de 80 centímetros en el pozo *ATD-0204* (Figura 30). Se presenta como fragmentos de chert negro, matriz soportados en una matriz de sílice.

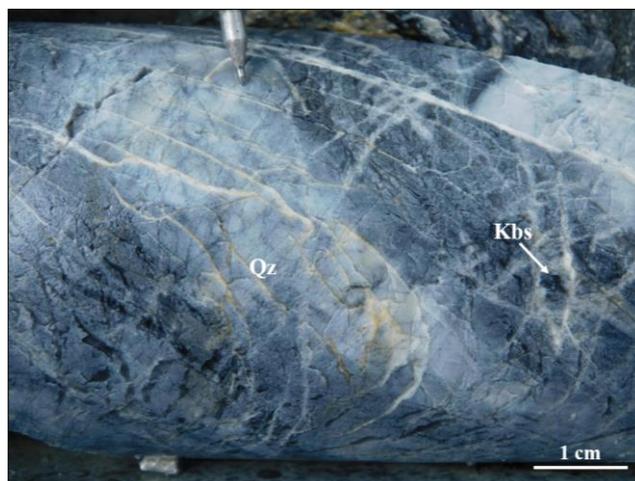


Figura 30. Brecha hidrotermal en pozo *ATD-0204*. Compuesta por fragmentos de chert negro (Kbs) en una matriz silíceica (Qz). Profundidad 181.30 m. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.2 Alteraciones

7.1.2.1 Alteración supérgena

Se encuentra en los primeros metros de perforación: en los primeros 15 metros en el pozo *ATD-0199*; y en los pozos *ATD-0204* y *ATD-0205* en los primeros 35 metros. Se produce por la meteorización química que generan los agentes atmosféricos, tales como el agua de escorrentía e infiltración y el oxígeno, dando lugar a la formación de óxidos de hierro como goethita y limonita (Figura 31).



Figura 31. Alteración súpergena en el pozo *ATD-0204*. Clastos de chert gris en una matriz limoarcillosa con tonalidades marrones/pardas indicativas de la formación de óxidos de hierro. Entre 0.00 m y 10.20 m.

7.1.2.2 Silicificación

Se presenta predominantemente en shales y lodolitas grisáceas de manera intensa, lo que define la formación de chert negro (Figura 26) y chert gris (Figura 25) respectivamente, otorgándole a estas rocas brillo vitreo, fractura concoidea y aumento en la dureza (aproximadamente 7 según la escala de Mohs) como características diagnosticas. Esta alteración es de suma importancia en shales, ya que como se ha explicado anteriormente, este se encuentra interstratificado con el sulfuro masivo, por lo que su ocurrencia indica proximidad con este. También se presenta en intensidades moderadas a leves en areniscas e intrusivos.

7.1.2.3 Dolomitización (DOL)

Esta alteración da la apariencia de una textura “arenosa” en los shales (Figura 32) y en los tres pozos se dispone suprayaciendo el sulfuro masivo.



Figura 32. Shale dolomitizado en el pozo *ATD-0204*. Profundidad: 203.00 m. Abreviatura de nombre mineral tomada de Whitney & Evans (2010).

7.1.2.4 Alteración fílica

Es el tipo de alteración más común y afecta los intrusivos de los tres pozos. La sericitización se define como la formación de arcillas (no necesariamente sericita) que afectan de manera selectiva las plagioclasas y los anfíboles. La sericita se observa en tono amarillentos (Figura 33) con dureza de aproximadamente 2 en la escala de Mohs y en el caso de los anfíboles conservan su hábito prismático característico.

Cuando además de generarse dichas arcillas, se forma de cuarzo secundario y pirita, se clasifica como alteración fílica.

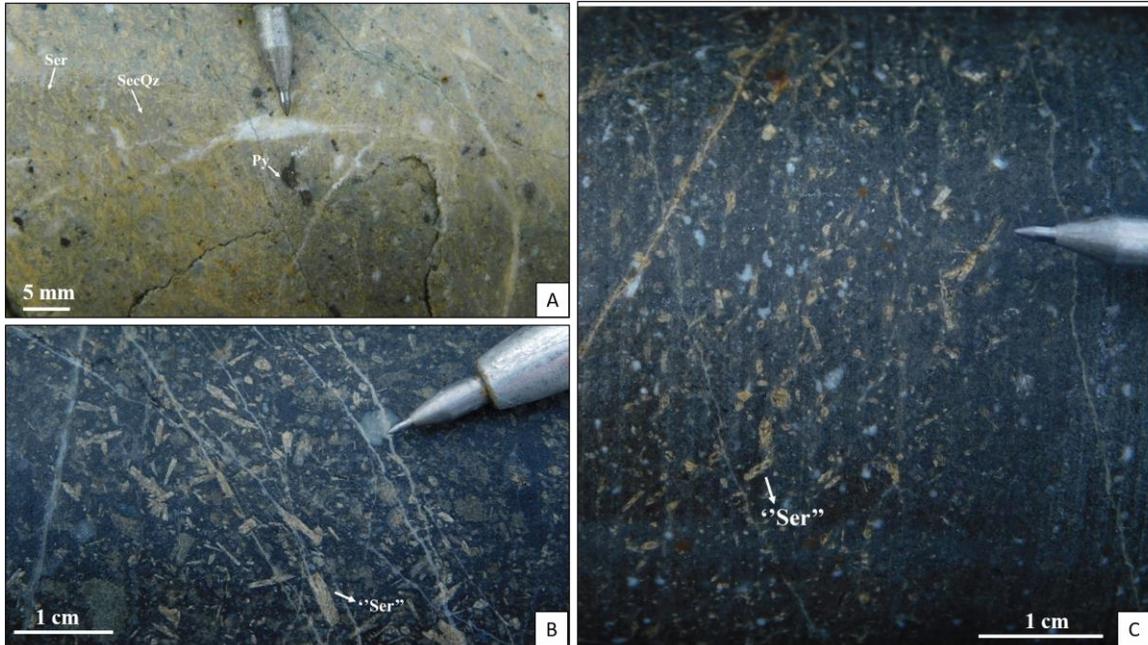


Figura 33. Alteración sericitica y filica en los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Alteración filica. Ensemble Sericita (Ser) + Cuarzo secundaria (SecQz) + Pirita (Py). Profundidad: 209.20m. B) *ATD.0204*. Alteración sericitica. Anfiboles y plagioclasas alterados a arcillas (“Ser”). Profundidad: 172.85m. C) *ATD-0205*. Alteración sericitica. Anfiboles y plagioclasas alterados a arcillas (“Ser”). Profundidad: 222.00m. Abreviatura de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

7.1.2.5 Cloritización

Altera de manera pervasiva a los basaltos, otorgándoles una tonalidad verdosa. En algunas ocasiones se presenta con carbonatos (Figura 28).

7.1.3 Mineralización

La mineralización de los tres pozos se define por la ocurrencia de pirrotina, pirita, y calcopirita; decreciendo cuantitativamente en el siguiente orden: sulfuro masivo, chert negro, diques, rocas sedimentarias, chert gris y basalto. Lo estilos de mineralización mas comunes son parches, vetillas y diseminaciones de pirita y pirrotina en chert gris, areniscas (Figura 34), intrusivos y brechas hidrotermales (Figura 35).

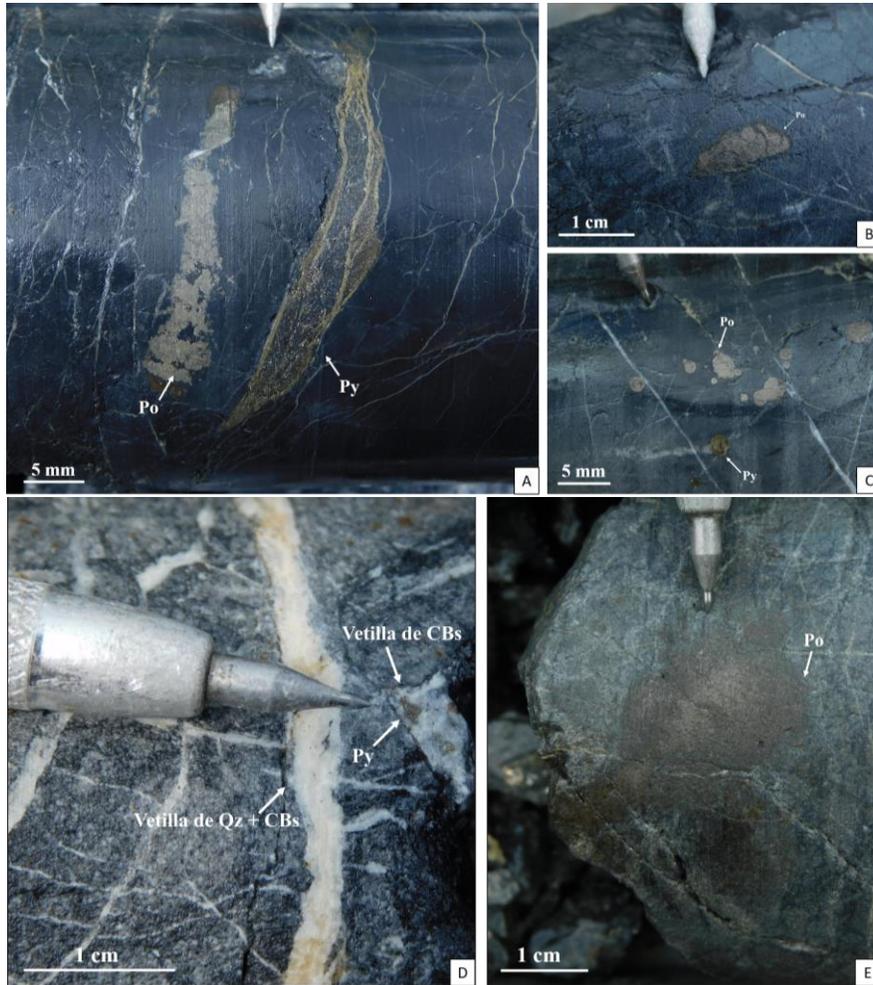


Figura 34. Mineralización en chert gris y areniscas. A) *ATD-0199*. Chert gris con sílice relleno de fracturas, vetilla de pirita (Py) y pirrotina (Po). Profundidad: 74.80 m. B) *ATD-0204*. Chert gris con pirrotina en parche. Profundidad: 85.75 m. C) *ATD-0205*. Chert gris con pirrotina (Po) y pirita (Py) en parches. Profundidad: 74.20 m. D) Arenisca moderadamente silicificada con pirita en vetilla de carbonatos. Profundidad: 15.85 m. E) Arenisca fina con pirrotina en parche. Profundidad: 59.50 m. Abreviatura de nombres minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).

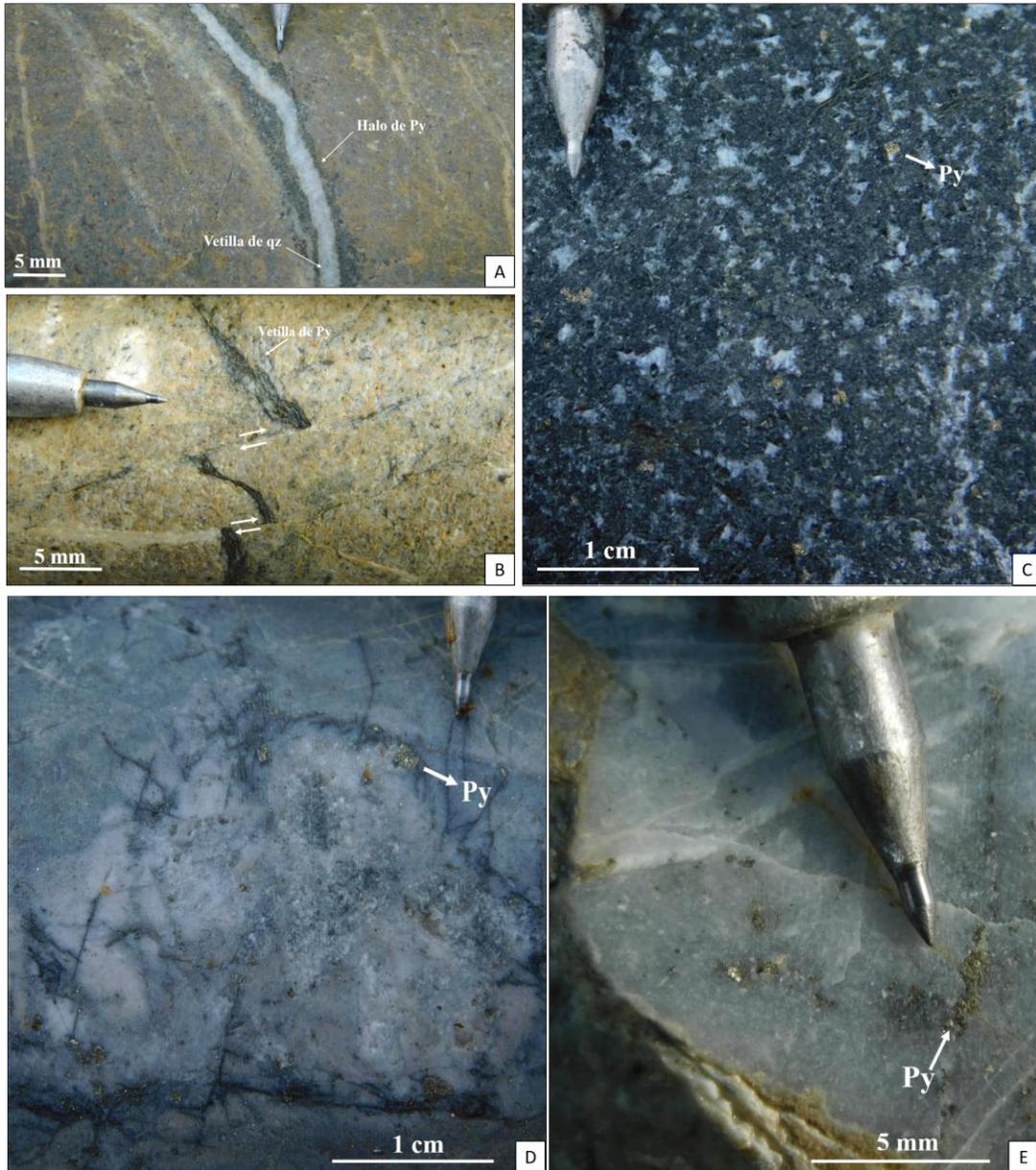


Figura 35. Mineralización en intrusivos y brecha hidrotermal. A) *ATD-0199*. Intrusivo obliterado por alteración filica definida por ensamble sericita+cuarzo+pirita. La pirita se presenta diseminada y como un halo alrededor de la vetilla de cuarzo. Profundidad: 209.30 m. B) *ATD-0204*. Intrusivo con vetilla de pirita afectada por fallas sintectónicas. Profundidad: 169.50 m. C) *ATD-0205*. Intrusivo 2 con carbonatos en amígdalas y pirita (Py) diseminada. Profundidad: 66.10 m. D) *ATD-0204*. Brecha hidrotermal silíceica con pirita euhedral diseminada. 181.80 m. E) *ATD-0204*. Brecha hidrotermal silíceica con pirita diseminada y en stringers. Profundidad: 181.90 m.

7.1.4 Estructuras

Las estructuras de mayor relevancia son las zonas de daño y *gauge* (Figura 37) ya que la definición de estas permitirá la planeación estratégica de los pozos para evitar la pérdida de herramientas, desviación del pozo o la ruptura de tubería. Se considera que la zona de *gauge* define el eje de la falla, ya que son zonas en las que la trituración de la roca llega al punto de convertirla en arcilla, y la zona de daño representa zonas más distales. Dicha interpretación, permite el modelamiento estructural de fallas locales.

Además, se tiene en cuenta la inclinación de la laminación y los contactos entre las unidades litológicas, con el fin de conocer con mayor precisión la distribución de las estructuras (Figura 36).

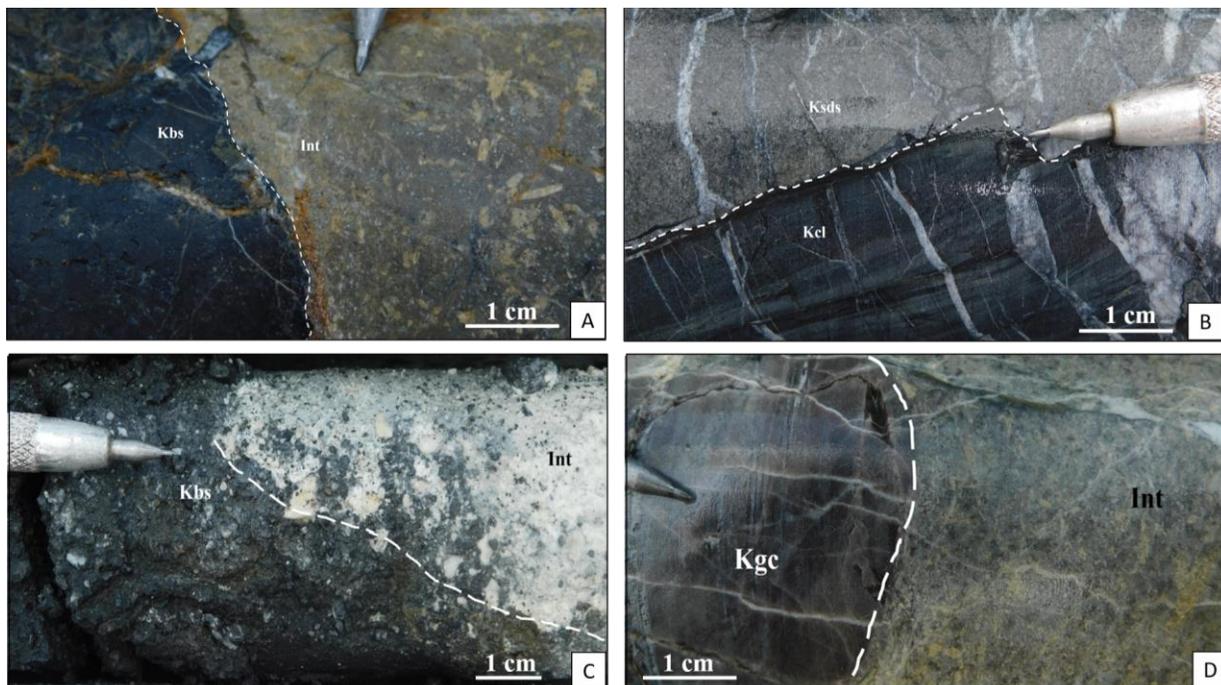


Figura 36. Contactos litológicos en los pozos *ATD-0199* y *ATD-0205*. A) *ATD-0199*. Contacto intrusivo con chert negro (Kbs) en inclinación de 85°. Profundidad: 192.40 m. B) *ATD-0199*. Contacto neto con inclinación de 20° entre arenisca (Ksds) media y chert gris laminado (Kcl) con carbonatos en venillas. Profundidad: 120.50 m. C) *ATD-0205*. Contacto intrusivo con chert negro (Kbs) con inclinación de 60° en zona de *gauge*. Profundidad: 221.40 m. D) *ATD-0205*. Contacto intrusivo con chert gris en 78° de inclinación. Profundidad: 189.70 m.

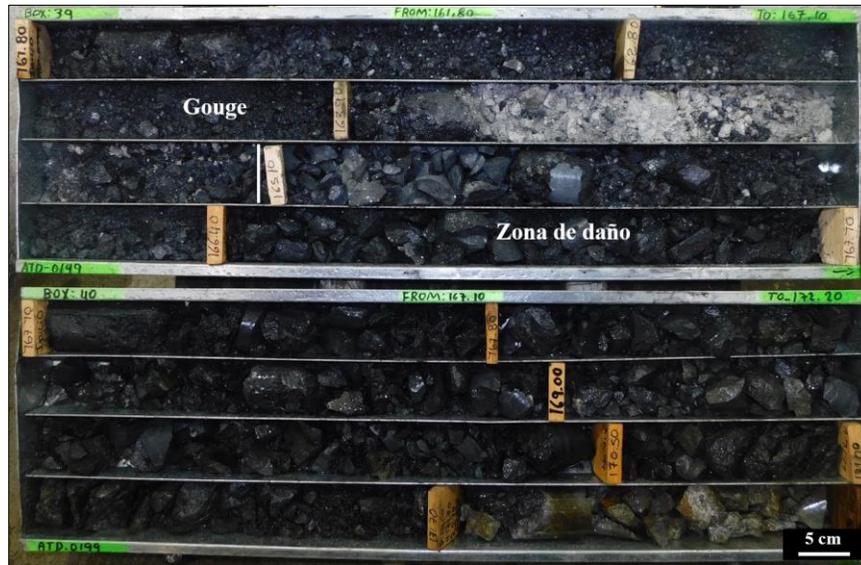


Figura 37. Estructuras en el pozo *ATD-0199*. Zona de *gauge* en chert negro e intrusivo, seguido de zona de daño de chert negro. Entre 161.80 m y 172.20 m.

7.2 Muestreo

En los tres pozos se muestreó el sulfuro masivo y el chert negro subyacente, debido a que este presentaba parches de calcopirita y pirita, y los resultados de los controles de calidad insertados confirmaron la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Posterior a la recepción de los resultados, se realizó la ponderación de las leyes en función del intervalo muestreado. A continuación, se presentan los interceptos de los pozos *ATD-0199* (Figura 38), *ATD-0204* (Figura 39) y *ATD-0205* (Figura 40), y las leyes de cobre y oro ponderadas para cada uno de ellos (Tabla 5).



Figura 38. Leyes de Cu y Au del pozo *ATD-0199*. Se interceptó 9.10 metros de sulfuro masivo de pirita y posteriormente 4.80 metros de sulfuro masivo de calcopirita. (Kbs = chert negro, Int=intrusivo).



Figura 39. Leyes de Cu y Au del pozo *ATD-0204*. Se interceptó 5.00 metros de sulfuro masivo de calcopirita y pirita. (Kbs = chert negro, Int=intrusivo)



Figura 40. Leyes de Cu y Au del pozo *ATD-0205*. Se interceptó 6.95 metros de sulfuro semimasivo de calcopirita y pirita. (Kbs = chert negro, Int=intrusivo)

Tabla 5. Resumen de los interceptos de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*.

Pozo	Intervalo intercepto (m)	Intercepto (m)	Ley Cu (%)	Ley Au (g/ton)
<i>ATD-0199</i>	171.10-180.80	9.10	0.97	5.27
	183.80-188.60	4.80	1.61	3.17
<i>ATD-0204</i>	199.30-204.30	5.00	4.84	12.26
<i>ATD-0205</i>	205.80-212.75	6.95	2.21	1.18

Para la obtención de la densidad de los interceptos, se realizó el envío al laboratorio interno de Miner S.A 8, 12 y 4 muestras de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* respectivamente, y una muestra de cada pozo para ALS. Por razones de confidencialidad, se presenta un resultado por pozo (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de densidad de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*.

Pozo	Intervalo muestreado (m)	Densidad (g/cm ³)
<i>ATD-0199</i>	174.20 – 174.30	3.40
<i>ATD-0204</i>	199.40 – 199.55	4.00
<i>ATD-0205</i>	210.35 – 210.45	3.20

7.3 Medición de pozo

A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada pozo:

Tabla 7. Resultados de la medición del pozo *ATD-0199*.

Pozo planeado ATD-0199		
Azimut: 349.00°		
Inclinación: -7.50°		
Pozo perforado		
Profundidad	Azimut (°)	Dip (°)
0.00	349.03	-6.32
20.00	349.21	-6.68
40.00	349.69	-6.61
60.00	349.58	-6.50
80.00	349.45	-6.28
100.00	349.35	-5.70
120.00	349.16	-5.03
140.00	349.29	-4.20
160.00	349.00	-4.77
180.00	348.76	-4.36
200.00	348.50	-4.55
210.72	348.81	-4.77

Tabla 8. Resultados de la medición del pozo *ATD-0204*.

Pozo planeado ATD-0204		
Azimut: 352.00°		
Dip: -5.00°		
Pozo perforado		
Profundidad	Azimut (°)	Dip (°)
0.00	352.04	-2.99
20.00	351.06	-2.69
40.00	350.00	-1.99
60.00	350.21	-3.11
80.00	350.38	-3.20
100.00	350.05	-3.02
120.00	349.64	-2.97
140.00	350.01	-2.95
160.00	350.41	-2.57
180.00	350.84	-2.55
200.00	351.34	-2.66
220.00	352.45	-3.23
226.43	352.80	-3.43

Tabla 9. Resultados de la medición del pozo *ATD-0205*.

Pozo planeado <i>ATD-0205</i>		
Azimut: 354.50°		
Dip: -8.50°		
Pozo perforado		
Profundidad	Azimut (°)	Dip (°)
0.00	354.41	-7.91
20.00	353.30	-7.42
40.00	352.82	-6.60
60.00	352.93	-6.77
80.00	353.00	-6.25
100.00	353.12	-5.72
120.00	352.95	-5.69
140.00	352.68	-5.76
160.00	352.58	-5.56
180.00	352.54	-6.13
200.00	352.53	-6.69
210.70	356.59	-8.30

El pozo *ATD-0199* tuvo una variación azimutal hacia el este de 0.5° en promedio y se ejecutó con 2° de inclinación menor a la propuesta (Tabla 7). El pozo *ATD-0205* varió en hasta 2° azimutales con tendencia a desviarse predominantemente al oeste y su inclinación fue en promedio 2° grados menor a la planeada (Tabla 8). Finalmente, el pozo *ATD-0204* tuvo una variación mínima hacia el oeste, pero terminó con una variación de 2° al este y su inclinación fue menor a la planeada por 2° aproximadamente (Tabla 9).

A pesar de que los tres pozos tuvieron variaciones, ninguna fue mayor a la aceptable que equivale a un grado por cada cien metros.

7.4 Modelamiento 3D de los pozos perforados

Inicialmente se cargó la información de los pozos para observar su variación con respecto a los pozos planeados (Figura 41). Esto permitió reconocer a que zonas reales pertenecen los núcleos recuperados.

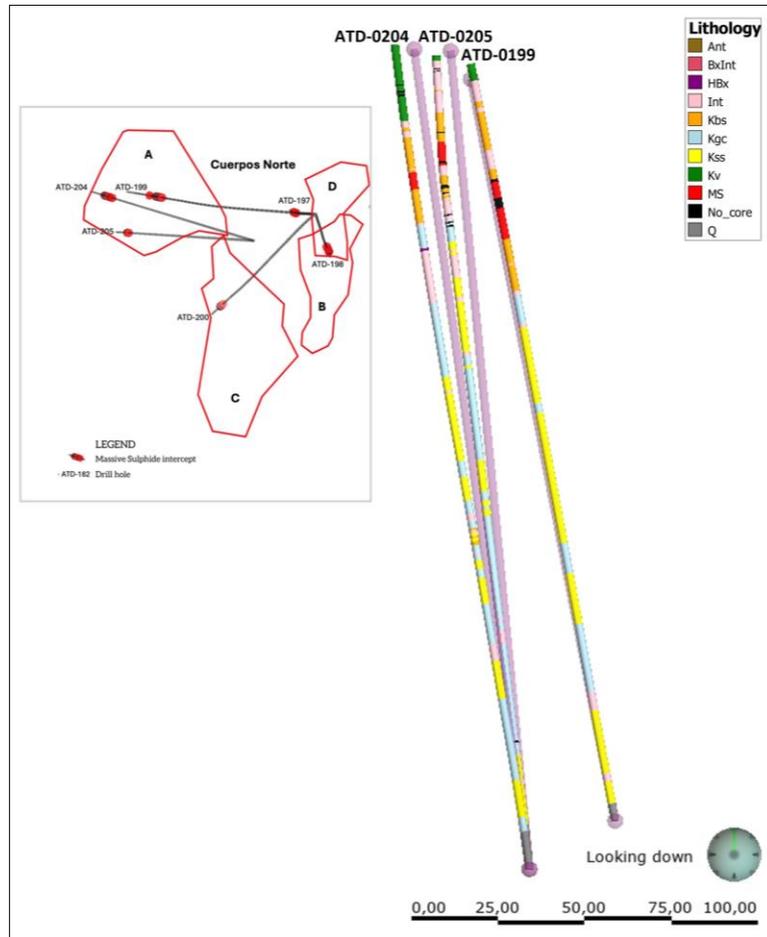


Figura 41. Comparación entre los pozos planeados y perforados, vista en planta. A la izquierda la posición relativa del cuerpo A respecto a los pozos. Los pozos de color violeta representan los pozos planeados y la nomenclatura indica el final de los pozos.

Se observa que la inclinación de los tres pozos fue menor a la planeada; y la desviación azimutal fue mínima, casi imperceptible a esta escala de trabajo. A pesar de dicha variación, los pozos perforaron dentro de la zona de interés (Figura 20), por lo que se interpreta que el sulfuro masivo interceptado hace parte del Cuerpo A.

Una vez confirmado que los pozos interceptaron el target objetivo, se realizó la columna estratigráfica para cada uno de ellos (Figura 42) que además de ser útil para comprender más fácilmente la distribución de la mineralización y las estructuras en las diferentes litologías; permite

interpretar la continuidad lateral y temporalidad de las unidades litológicas; y reconstruir el ambiente de formación de estas y su evolución en el tiempo.

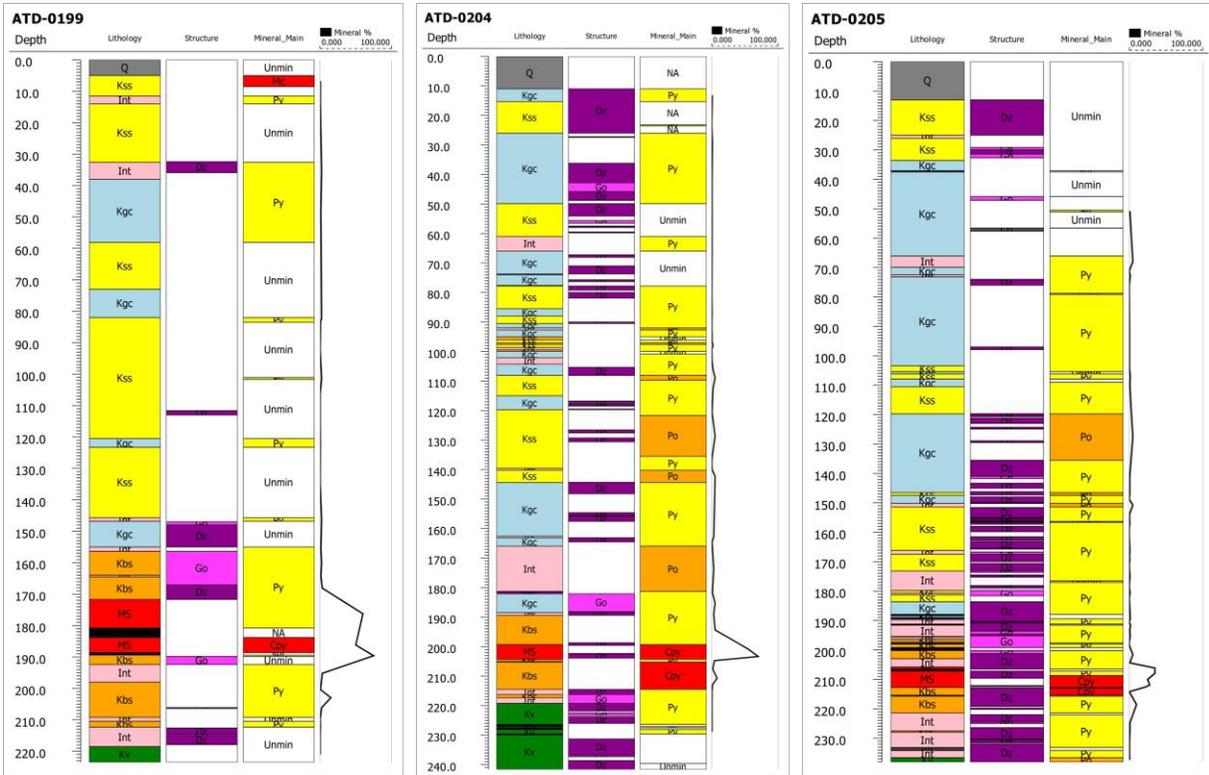


Figura 42. Columnas estratigráficas para los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205*.

Los basaltos representan el basamento de la secuencia estratigráfica de El Roble, y según lo observado en las columnas, es posible asegurar que estos afloran en el sector este y que las unidades más recientes afloran en el sector oeste de la zona perforada, lo cual confirma que la secuencia estratigráfica se encuentra basculada y que los contactos litológicos tienen ángulo de buzamiento casi verticales (Figura 36). Además, la ocurrencia de peperitas en el pozo *ATD-0199* indica que las rocas siliciclásticas aún estaban húmedas y sin consolidar cuando se generaron las intrusiones máficas, lo que sugiere que el vulcanismo estaba en curso durante la depositación del chert negro; lo cual resulta muy importante para la exploración ya que dichas intrusiones máficas pudieron emplazarse a lo largo de estructuras que sirvieron como conducto para los fluidos mineralizantes

responsables de la formación del sulfuro masivo volcanogénico. Adicionalmente, se observan cuerpos intrusivos repetidamente a lo largo de la secuencia, los cuales frecuentemente contienen xenolitos de basaltos, chert negro y arenisca, por lo que son el resultado de actividad magmática posterior a las dichas unidades litológicas.

Por otra parte, la depositación de sedimentos pelágicos sobre los basaltos indica un ambiente propio de una cuenca oceánica; dichos sedimentos pueden estar compuesta de material sedimentario derivado de ambientes subaéreos y microfósiles, pero podría tener material piroclástico del tamaño de cenizas derivado de la acción de los volcanes subaéreos típicos de las cuencas backarc. La silicificación de dichos sedimentos pelágicos (lutitas carbonosas) indica que hubo procesos de máxima hidrólisis por la circulación de fluidos hidrotermales con concentraciones elevadas de sílice, los cuales disolvieron los minerales existentes y precipitaron iones de Si.

Considerando que el sulfuro masivo y semimasivo yace sobre el chert negro y se hospeda en este, el depósito se habría formado como producto de reemplazamiento en los sedimentos pelágicos, posiblemente debido a la temprana formación y posterior disolución de dolomita, proceso que habría formado la porosidad secundaria necesaria para la precipitación de minerales de mayor temperatura, como pirita, sílice y finalmente calcopirita.

Una evidencia de lo anterior es que, en los tres pozos, al sulfuro masivo le suprayace chert negro con alteración a dolomita, lo que puede representar zonas en las que el fluido hidrotermal no alcanzó a generar disolución y reemplazamiento.

Luego, el chert gris se depositó sobre el chert negro dolomitizado, por lo que este pudo haber cumplido la función de roca sello, permitiendo que el fluido se concentrara y recirculara en los estratos infrayacentes para la posterior formación del SMV.

Finalmente se depositaron rocas sedimentarias, principalmente areniscas intercaladas ocasionalmente con limolitas, lo que indica corrientes de turbidez que formaron secuencias Bouma incompletas que podrían ser propias de un entorno marino poco profundo o implicarían que dichas corrientes de turbidez recorrieron distancias significativas y que la fuente de dicho material pudo no ser proximal a la cuenca de depositación. Además, la aparición de pirita y pirrotina a lo largo de toda la secuencia indica el ascenso de fluidos hidrotermales.

También se puede observar que en los pozos *ATD-0204* y *ATD-0205* que parten del mismo collar, hay constantes zonas de daño y *gauge*, lo que indica la presencia de fallas (probablemente satélites de las fallas regionales) que han generado trituración de la roca. Por otra parte, la zona perforada por el pozo *ATD-0199* parece tener menor influencia de fallamiento, al contar con menos zonas de daño.

Ya que los pozos perforados interceptaron el cuerpo A, se procede a editar la traza del modelo existente con la nueva información obtenida. Ya que no es posible publicar dicho modelo, para fines prácticos, se realizó un modelo conceptual del cuerpo A con los interceptos de estos tres pozos (Figura 43).

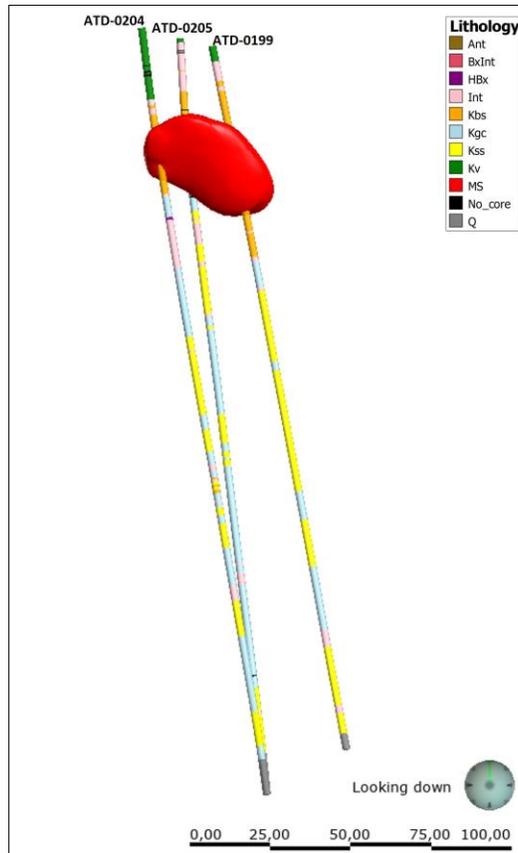


Figura 43. Modelo conceptual del Cuerpo A en vista de planta. La nomenclatura indica el final de los sondajes, los cuales se observan como líneas debido a que son sub-horizontales y se encuentran entre 25.0 m y 35.0 m bajo la topografía de superficie. Vista en planta.

Posteriormente, se realizan secciones longitudinales a los pozos perforados (Figura 44) con el objetivo de ver la relación espacial del modelo inicial con la información obtenida de los pozos nuevos, y determinar si dicho modelo debe ampliarse, reducirse o es consistente con la interpretación previa.

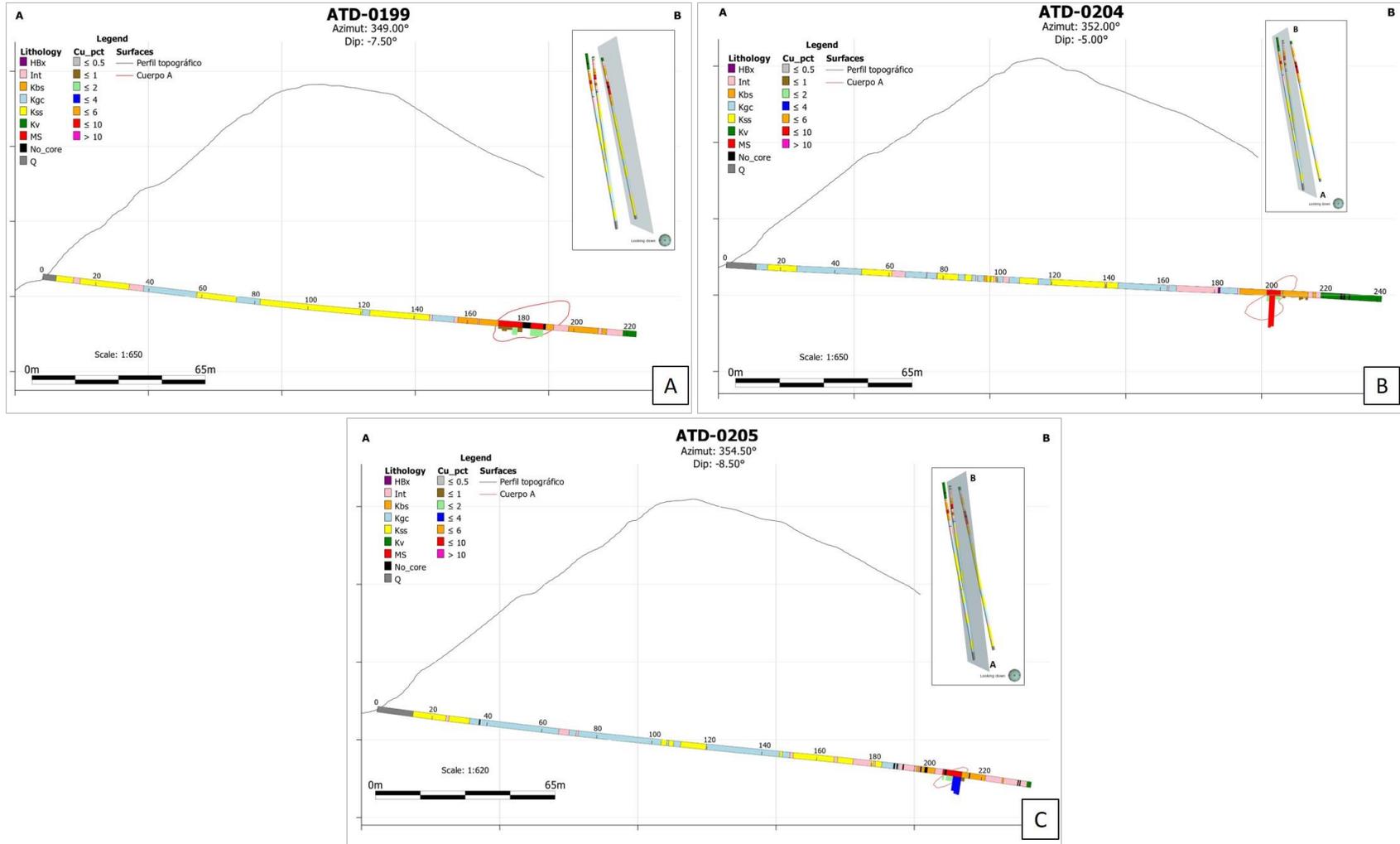


Figura 44. Secciones longitudinales de los pozos *ATD-0199*, *ATD-0204* y *ATD-0205* A) Sección de 349° de azimut del pozo *ATD-0199*. B) Sección de 352° de azimut del pozo *ATD-0204*. C) Sección de 354° de azimut del pozo *ATD-0205*. A la derecha de las secciones, vista en planta de la posición de la sección con respecto al pozo en vista de planta.

Como se observa en las secciones, el cuerpo mineralizado tiene un buzamiento preferencial de 50° al E y 290° azimutales en rumbo. De acuerdo con la sección longitudinal al pozo *ATD-0199*, debería reducirse la traza del cuerpo ya que se incluyó material sin mineralización relevante. Por otra parte, se podría evaluar la ampliación de la traza en el pozo *ATD-0204*, considerando que para el chert negro se obtuvieron concentraciones de cobre entre 0.5% y 1.0%. La traza del cuerpo *ATD-0205* parece ajustarse bien con el modelo conceptual propuesto, porque, aunque incluye chert negro, se obtuvieron valores entre 0.5% y 1.0% de Cu. Para posteriores modificaciones, además de evitar la dilución al incluir tramos estériles en el cuerpo, se debe evitar también la sobre estimación, al ampliar la traza a zonas sin perforación.

El *trend* y extensión de este modelo se ajustarían progresivamente con la información obtenida de nuevas perforaciones, ya que tres pozos no son suficientes para un crear un modelo geológico confiable.

8. Conclusiones

- Los resultados exitosos de la campaña de exploración brownfield confirman la presencia y extensión de los recursos minerales en las áreas perforadas. Esto, afirma la viabilidad económica de la operación y el potencial significativo del target para la expansión de las reservas minerales.
- En los pozos *ATD-0199* y *ATD-0205* hay zonas sin recuperación de testigos en los interceptos, por lo que es de anotar que, a pesar de las buenas prácticas implementadas, existe la posibilidad de sesgos en la representatividad de las muestras, ya que la recuperación pudo ser de un intervalo excepcionalmente rico o uno excepcionalmente pobre. Estas variabilidades destacan la necesidad de una evaluación crítica y cuidadosa de los resultados, y refuerza la importancia de continuar avanzar con la malla de perforación *infill* para garantizar una interpretación más precisa de los cuerpos.
- Es posible generar nuevas zonas de interés exploratorio e inferir la dirección de extensión del Cuerpo A mediante el refinamiento de su *trend* (azimut y buzamiento). Esto, entendiendo que los sulfuros masivos tienden a presentarse en “*clusters*” o grupos de lentes con tendencias similares.
- La presencia de más zonas de daño y *gauge* en los pozos *ATD-0204* y *ATD-0205* en comparación con el pozo *ATD-0199* sugiere la presencia de una falla con mayor proximidad a estos dos pozos.
- En los pozos *ATD-0204* y *ATD-0205* se obtuvieron valores de Cu entre 0.5% y 1.0% en el chert negro, por lo que la traza del cuerpo mineralizado no tiene que limitarse estrictamente al sulfuro masivo, en cambio, puede extrapolarse a zonas de chert negro.

- En congruencia con lo observado en las columnas estratigráficas de los tres pozos, se puede observar que la mineralización en el chert gris, las rocas sedimentarias, los basaltos y el intrusivo es nula o mínima, y se presenta generalmente como pirita o pirrotina diseminada. Lo anterior, indica la interacción de un fluido hidrotermal de menor temperatura al que formo el sulfuro masivo de calcopirita con la roca caja.

9. Recomendaciones

- Consolidar la información recopilada del logueo de estructuras y realizar mapeos superficiales detallados en la zona de exploración para realizar un modelo estructural de las fallas locales y satélites que afectan la zona. La comprensión de la geometría y distribución de dichas estructuras permitirá interpretar la ocurrencia de los cuerpos mineralizados y, en consecuencia, orientar de manera estratégica las futuras actividades de la campaña de exploración.
- Realizar la descripción e interpretación detallada de secciones pulidas como parte integral de las actividades exploratorias, con el fin de contribuir al entendimiento de la génesis y evolución del yacimiento.
- Hacer análisis e interpretación de inclusiones fluidas, para contribuir al entendimiento del origen, temporalidad y correlación de los fluidos hidrotermales que formaron el yacimiento.

Referencias

- Álvarez, E., & González, H. (1978). *Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao)*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
- Álvarez, J. (1971). *Mapa geológico generalizado y localización del muestreo geoquímico de la Cordillera Occidental, Departamentos de Chocó y Antioquia*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
- Arboleda, G., Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., Carmona, J., & Medina, E. (2009). *Cartografía geológica y muestreo geoquímico en la parte norte de la cordillera Occidental, planchas 165 y 185 (396 kilómetros cuadrados)*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
- Atico Mining Coportacion. (s.f). *Atlas litológico: alteraciones y mineralizaciones*.
- Barrie, C. T., & Hannington, M. D. (1999). *Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition*. *Economic Geology*, (8): 1-11.
- Bonnet, A.-L., & Corriveau, L. (2007). *Alteration vectors to metamorphosed hydrothermal systems in gneissic terranes, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada—A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. *Mineral Deposits Division*, (5): 1035–1049.
- Calle, B., & Salinas, R. (1986). *Geología y Geoquímica de la Plancha 165 Carmen de Atrato*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
- Cartwright, D. (2019). *Geoquímica y petrografía de rocas de la Formación Barroso, una mirada a su relación con los complejos máficos de la Cordillera Occidental y Central*. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/f043e513-02a5-4322-9ac2-d9bebce0eac3/download>

Cathles, L.M. (1981). *Fluid flow and genesis of hydrothermal ore deposits: in Skinner*. Economic geology, (75): 424–457.

Cathles, L.M., Erendi, A.H.J., Theyer, J.B., & Barrie, C.T. (1997). *How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusion event?.* Economic Geology, (92), 766–771.

Cediel, F., & Shaw, R. P. (2003). *Tectonic Assembly of the Northern Andean Block*. Asociación Colombia de Geólogos y Geofísicos de la Energía, (79): 815–848.

Diaz Cañas, J.S. (2015). *Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco, y su significado en la formación de un domo marginal a las Fallas de Romeral*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54595>

Espinal, J.E. (2020). *Caracterización y Modelo Estructural del Yacimiento de Sulfuros Masivos Volcanogénicos de la Mina el Roble*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79981>

Etayo–Serna, F., González, H. & Álvarez, E. (1980). *Mid-Albian Ammonites from Northern Western Cordillera, Colombia*. Geología Norandin, (2): 25–30.

Fandiño Bohórquez, J. H. (2020). *Geometría de subducción de la placa de Nazca bajo el noroeste de Suramérica, a partir del análisis de microsismicidad reciente* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78055>

Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., & Galley, A. G. (2005). *Volcanogenic massive sulfide deposits*. Society of Economy Geologist, (100): 523-560.

https://www.researchgate.net/publication/284690367_Volcanogenic_massive_sulfide_deposits

Galley, A.G., Hannington, M., & Jonasson, I. (2007). *Volcanogenic massive sulphide deposits*, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Mineral Deposits Division, (5): 141-161.

Gómez Mosqueda, V. G. (2014). *Mineralización de Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS) alojados en el sub Terreno Teloloapan: área de Tlanilpa, Guerrero*. [Tesis de maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/5227

González, H., & Londoño, A. C. (s.f). Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia paleoceno-eoceno. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.

Kamwanje, I. (2022). *Underestimating Greenfield and Brownfield in mineral exploration*. Mining Trade News. <https://miningtradenews.net/understanding-greenfields-and-Brownfields-in-mineral-exploration-and-mining/>

Kelly, T. (2020). *El Roble Mine updated mineral resource and initial mineral reserve estimates*. Technical Report 43-101. <https://aticominig.com/projects/el-roble-mine/ni-43-101-mineral/>

La república. (2022). *El Hub de Innovación del Cobre nace en Colombia para resolver desafíos del sector*. <https://www.larepublica.co/empresas/el-hub-de-innovacion-del-cobre-nace-en-colombia-para-resolver-desafios-del-sector-3445649>

Lambert, I.B., & Sato, T. (1974). *The Kuroko and associated ore deposits of Japan—A review of their features and metallogenesis*. *Economic Geology*, (69): 1215–1236.

- Lechner, M.J., Earnest, D.F., (2010). *Amended technical report El Roble copper-gold project, Choco Department, Colombia.*
https://www.miningdataonline.com/reports/aticominig_El_Roble_2015.pdf
- Morgan, L. A., & Schulz, K. J. (2012). *Physical volcanology of volcanogenic massive sulfide deposits*. *Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model*, (1), 65-95.
- Murillo Bedoya, J. M. (2020). *Petrographic and litho-geochemical characterization of the vms deposit at El Roble mine, colombian western cordillera* [Tesis de pregrado, Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/24651>
- Ortiz B, Franklin. (1988). *El Roble, un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénicos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Peñaloza, I. (2020). *La minería, más compleja de lo que imaginas*. *Revista Ciencias de la Tierra*.
<https://revistacienciasdelatierra.com/georecursos-naturales/recursos-minerales/la-mineria-mas-compleja-de-lo-que-imaginas/5292/>
- Pisutha-Arnond, V., & Ohmoto, H. (1983). *Thermal history, and chemical and isotopic compositions of the Ore-Forming fluids responsible for the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroku district of Japan*. *The Kuroko and Related Volcanogenic Massive Sulfide Deposits* (5). <https://doi.org/10.5382/mono.05.30>
- Poulsen, H. & Hannington, M. (1995). *Auriferous Volcanogenic Sulfide Deposits, in Eckstrand*. *Geology of Canada*, (8), 183-196.
- Pratt, W. (2012). *The El Roble Massive Sulfide, Chocó, Colombia*. Geological mapping Ltda.
- Price, P. (1953). *Wall-rock alteration in northwestern Quebec*. *Geological Society of America Bulletin*, (64), 1464 p.

- Rodríguez, G., & Zapata, G. (2013). *Comparative analysis of the Barroso Formation and Quebradagrande Complex: a volcanic arc tholeiitic-calcoalcaline, segmented by the fault system Romeral in Northern Andes*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (33), 39-58.
- Salas Vásquez, A. T. (2016). *Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC*. [Tesis de pregrado, Universidad Andrés Bello]. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/3670>
- Salcedo, N. (2023). *Aportes del sector minero en 2022 y 2023*. Asociación Colombia de Minería. <https://acmineria.com.co/comunicado-dic2023-aportes-sector/>
- Sales, R.H., & Meyer, C. (1948). *Wall rock alteration at Butte, Montana*. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Transactions*, (178): 9–35.
- Sangster, D.F. (1977). *Some grade and tonnage relationships among Canadian volcanogenic massive sulphide deposits*. *Geological Survey of Canada, Report of Activities*, (77), 5–12.
- Satter, A., & Iqbal, G. (2016). *Oil and gas recovery methods in low permeability and unconventional reservoirs*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800219-3.00019-X>
- Shanks, W., & Thurston, R. (2012). *Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model en Mineral Deposit Models for Resource Assessment*. <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/c/>
- Sherlock, R.L., Roth, T., Spooner, E.T.C., & Bray, C.J. (1999). *The origin of the Eskay Creek precious metal-rich volcanogenic massive sulfide deposit: fluid inclusion and stable isotope data*. *Economic Geology*, (94), 803-824.
- Smith, G., & Pohl, D. (2012). *Atico Mining Corporation technical report on the El Roble Project*.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A. & Cisternas, A. (2000). *Geodynamics of the northern Andes' Subductions and intracontinental deformation (Colombia)*. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>

Taylor, C. D., Zierenberg, R. A., Goldfarb, R. J., Kilburn, J. E., Seal II, R. R., & Kleinkopf, M. D. (1986). *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits*. Geological Survey of United States. <https://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/CHAP16.pdf>

Witney, D, & Evans, B. (2010). *Abbreviations for names of rock-forming minerals*. American Mineralogist, (95), 185-187.