



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN EXPLORACIÓN
DE HIDROCARBUROS Y RECURSOS
MINERALES**

Curso 2022-2023

**Caracterización mineralógica del depósito de
Ni-Cu Enterprise, Copperbelt, Zambia.**
Mineralogical characterization of the Enterprise Ni-Cu
deposit, Copperbelt, Zambia

SILVIA VARAS VARAS

TUTOR/ES DEL TRABAJO: LOLA YESARES ORTIZ
RUBÉN PIÑA GARCÍA



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN EXPLORACIÓN
DE HIDROCARBUROS Y RECURSOS
MINERALES**

Curso 2022-2023

**Caracterización mineralógica del depósito de
Ni-Cu Enterprise, Copperbelt, Zambia.**
Mineralogical characterization of the Enterprise Ni-Cu
deposit, Copperbelt, Zambia

SILVIA VARAS VARAS

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

LOLA YESARES ORTIZ

RUBÉN PIÑA GARCÍA

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Silvia Varas Varas con NIF 49390615R, estudiante de Máster en exploración de hidrocarburos y recursos minerales en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022 -2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado ``Caracterización mineralógica del depósito de Ni-Cu Enterprise, Copperbelt, Zambia`` y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Lola Yesares Ortiz y Rubén Piña García.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 17 de enero de 2023.

Fdo.:

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS	1
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	4
2.1. Cinturón de Katanga.....	4
2.2. Región de los domos	5
2.3. Domo Kabompo.....	6
3. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO DE ENTERPRISE	7
4. METODOLOGÍA.....	11
5. RESULTADOS	13
5.1. Estilos de mineralización	13
5.2. Mineralogía.....	15
6. DISCUSIÓN	25
6.1. Asociaciones minerales	25
6.2. Fuentes de Ni y Cu.....	28
6.3. Comparación con antecedentes bibliográficos.....	29
7. CONCLUSIONES.....	30
8. BIBLIOGRAFÍA.....	31
9. ANEXOS	36

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Localización del Cinturón de Cu Centroafricano (cinturón de Katanga). (Caliteux <i>et al.</i> , 2004).....	1
Figura 2: Recursos medidos, indicados e inferidos del depósito Enterprise para una ley de corte del 0.15% de Ni (Gray <i>et al.</i> , 2020).....	2
Figura 3: Mapa geológico de la zona central del Central African Copperbelt. Rodeada se encuentra la zona donde se ubica el depósito Enterprise. (Modificado de Torremans <i>et al.</i> , 2018).....	5
Figura 4: Mapa de las unidades litológicas y las principales estructuras del área en la que se encuentra el domo Kabompo, realizado a partir de interpretaciones geofísicas. Rodeada se encuentra la zona donde se ubica el depósito Enterprise (Williams y Nisbet, 2017).....	6
Figura 5: Mapa geológico de la zona oriental del domo Kabompo que muestra la localización del depósito Enterprise. (Capistrant <i>et al.</i> , 2015).....	8
Figura 6: Mapa y corte geológico del área de depósito Enterprise, mostrando la estratigrafía, las estructuras, los sondeos realizados y la localización de la mineralización. (Capistrant <i>et al.</i> , 2015).....	10
Figura 7: Probetas y láminas utilizadas en microscopía.	11
Figura 8: Imágenes de distintos testigos del sondeo ENT-175 donde se identifican las distintas litologías y estilos de mineralización.....	14
Figura 9: Imágenes de microscopía óptica y de electrones retrodispersados (ER) de las distintas muestras analizadas	16
Figura 10: Imágenes de microscopía óptica y de electrones retrodispersados (ER) de las distintas muestras analizadas	17
Figura 11: Diagrama triangular en el que se muestran las concentraciones de los elementos principales de los sulfuros de Fe, de Ni y de Fe-Ni analizados mediante microsonda, así como la composición de referencia para cada uno de estos minerales.....	22
Tabla 1: Tabla con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar de las concentraciones de los distintos elementos analizados mediante microsonda en cada sulfuro.	23
Figura 12: Gráficos que muestran las concentraciones de los elementos traza de cada sulfuro utilizando los datos obtenidos de microsonda.	24
Figura 13: Secuencia paragenética del depósito..	28

RESUMEN

El depósito Enterprise se encuentra en la Provincia Noroccidental de Zambia, formando parte del Central African Copperbelt. Presenta mineralizaciones de Ni y Cu encajadas en una secuencia de unidades metasedimentarias neoproterozoicas, el Supergrupo Katanga. El proyecto de explotación de Enterprise pertenece a la empresa First Quantum Minerals Ltd., y actualmente se encuentra a la espera de un aumento en el precio del Ni para su potencial explotación. Cuenta con unas reservas medidas de 9.2 Mt con un contenido de 1.38% de Ni.

En este trabajo se estudia en detalle la mineralogía de las distintas mineralizaciones, las relaciones texturales entre los minerales y la química mineral de las fases metálicas más abundantes. Se han identificado tres tipos de estilos de mineralización: semimasiva, diseminada y venas. Los minerales de mena son pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), millerita (NiS), vaesita (NiS_2), polidimita (NiNi_2S_4), violarita (FeNi_2S_4) y pentlandita ($(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$), y en menor proporción, galena (PbS), magnetita (Fe_2O_4) e ilmenita (FeTiO_3).

Conocidos los distintos minerales que conforman las mineralizaciones, sus relaciones y texturas, su composición química, y la evolución geológica de la Copperbelt se han podido establecer cuatro asociaciones minerales: (i) pentlandita y pirita, (ii) millerita y calcopirita, (iii) magnetita, (iv) violarita, vaesita, pirita y polidimita. Estas asociaciones se formaron en distintas etapas, comprendidas entre la diagénesis tardía y la etapa postmetamórfica.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El depósito Enterprise es un yacimiento hidrotermal de Ni y Cu que forma parte de la provincia metalogénica del Central African Copperbelt (Fig. 1) (Gray *et al.*, 2020). Se sitúa en la Provincia Noroccidental de Zambia, dentro de la conocida como región de los domos, al este del domo Kabompo, siendo Solwezi la ciudad más próxima al depósito. El origen de las mineralizaciones en el Central African Copperbelt ha sido objeto de debate desde la década de 1930 (Sweeney *et al.*, 1991; Capistrant *et al.*, 2015; Caliteux *et al.*, 2004; Steven y Armstrong, 2003). Actualmente, se acepta que la formación de estos depósitos se debe a la acción de fluidos hidrotermales asociados a procesos sinsedimentarios, diagenéticos tempranos y diagenéticos tardíos (Caliteux *et al.*, 2004), aunque la fuente de Ni y Cu es un tema que aún genera controversia. La mineralización del depósito Enterprise aparece principalmente en forma de diseminaciones, venas (Gray *et al.*, 2020) y reemplazamientos semimasivos de sulfuros, encajados en una secuencia de unidades metasedimentarias neoproterozoicas (Capistrant, 2013).

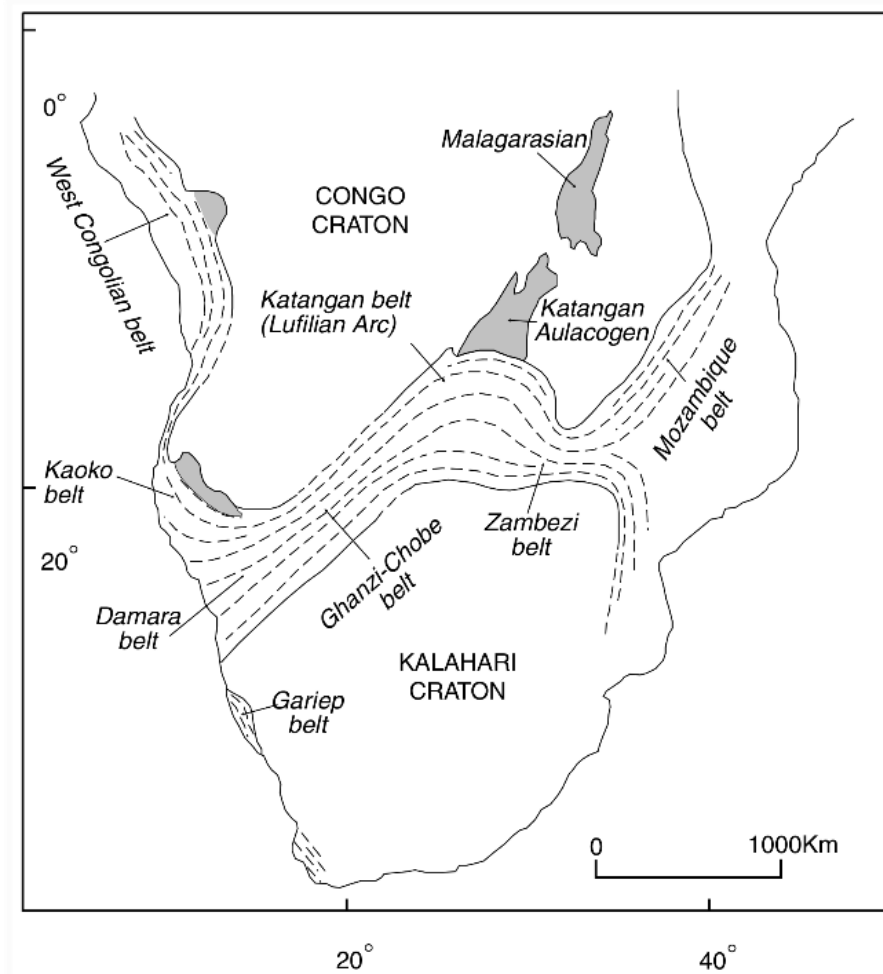


Figura 1: Localización del Cinturón de Cu Centroafricano (cinturón de Katanga). (Caliteux *et al.*, 2004).

Enterprise forma parte del proyecto Trident, perteneciente a First Quantum Minerals Ltd. (FQM). La exploración de esta zona comenzó en la década de 1950 y en el año 1996 quedó confirmada la existencia de mineralización en el depósito Enterprise. En la actualidad, su explotación se encuentra a la espera de una situación más favorable del precio del Ni, metal principal que se espera extraer (Gray *et al.*, 2020).

Los estudios realizados en 2019 por FQM, utilizando una ley de corte de Ni de 0.15%, estimaron unas reservas medidas de 9.2 Mt con un contenido de 1.38% de Ni, unas reservas indicadas de 28.5 Mt con un contenido de 0.91% de Ni y unas reservas inferidas de 9.3 Mt con un contenido de 0.71% de Ni, para el depósito Enterprise (Fig. 2). Las leyes de Cu del depósito alcanzan el 2,80 % (Gray *et al.*, 2020)

Classification	Material	Tonnes (Mt)	Density (t/m ³)	Ni (%)	Ni metal (kt)
Measured	Non-primary sulphide	3.7	2.56	1.07	39.3
	Primary sulphide	5.5	2.87	1.60	88.1
Measured subtotal		9.2	2.75	1.38	127.4
Indicated	Non-primary sulphide	2.7	2.71	0.53	14.4
	Primary sulphide	25.7	2.87	0.95	244.3
Indicated subtotal		28.5	2.86	0.91	258.7
Measured and Indicated total		37.7	2.83	1.03	386.1
Inferred	Non-primary sulphide	1.1	2.71	0.60	6.7
	Primary sulphide	8.2	2.87	0.73	59.8
Inferred subtotal		9.3	2.85	0.71	66.5

Figura 2: Recursos medidos, indicados e inferidos del depósito Enterprise para una ley de corte del 0.15% de Ni (Gray *et al.*, 2020).

De acuerdo con Caliteux *et al.* (2004), los depósitos del Central African Copperbelt se encuentran encajados en unidades litoestratigráficas cuyo ambiente deposicional presenta elevada salinidad, de tipo sabkha a supramareal, en las que la mineralización suele presentarse en forma de sulfuros diseminados asociados a estructuras sedimentarias. En función de la relación Co:Cu, Caliteux *et al.* (2004) clasifica los depósitos en pobres y ricos en Co, con relaciones de entre 0 y 0.02 para los primeros, predominantes en Zambia, y de entre 0.02 y 2.80 para los segundos, predominantes en Congo.

Según los mismos autores, la mineralogía metálica en estos depósitos está formada por pirita (FeS₂), calcopirita (CuFeS₂), bornita (Cu₅FeS₄), bravoíta ((Fe,Ni)S₂), carrolita (CuCo₂S₄), linneíta (Co₃S₄), siegenita (CoNi₂S₄), polidimita (Ni₃S₄), cattierita (COs₂), vaesita (NiS₂) y digenita (Cu₉S₅). A partir del análisis de los datos de inclusiones fluidas

realizado por Caliteux *et al.* (2004), estas mineralizaciones se habrían formado en una primera etapa sinsedimentaria a partir de fluidos de temperatura inferior a los 100°C y salinidades comprendidas entre 7 y 10% en peso y, en una segunda etapa diagenética tardía, a partir de fluidos que superarían los 200°C con salinidades próximas al 40% en peso. Las variaciones de Eh y pH de estos fluidos son las que determinan la zonación mineralógica de los sulfuros.

Sin embargo, la mineralización concreta del depósito Enterprise apenas ha sido estudiada a excepción de los trabajos realizados por Capistrant *et al.* (2015). En ellos se indica que el depósito está formado por una zona mineralizada de Ni y una de Cu de menor tamaño infrayacente. Según estos autores, la mineralización de Ni está constituida por bravoita, vaesita, millerita, pirita, calcopirita, molibdenita, pirrotina y carrolita, como minerales de mena, en forma de diseminaciones, reemplazamientos semimasivos y venas dentro de una roca gris oscura rica en cuarzo. Estos autores defienden que la mineralización de Ni se formó a partir de una primera etapa de Ni-Fe y una segunda etapa de Fe-Ni-Mo. Las dataciones realizadas mediante Re-Os asignan una edad de 540.6 ± 1.8 Ma a la segunda etapa de mineralización. La zona mineralizada de Cu está formada, de acuerdo con Capistrant *et al.* (2015), por pirita, calcopirita y bornita en forma de diseminaciones y venas en areniscas metamorfizadas ricas en talco. Los análisis de isótopos de S fueron realizados por estos autores en distintos sulfuros, pirita, millerita, bravoíta, vaesita, sulfuros de Ni y Ag, calcopirita, pirrotina y molibdenita, los cuales arrojaron valores bastante homogéneos, de entre -12‰ y $+17\text{‰}$, en su mayoría entre -1‰ y $+7\text{‰}$. Sin embargo, el trabajo de estos autores no hace un análisis de detalle de la mineralogía metálica, sus relaciones texturales y química mineral en los diferentes estilos de mineralización identificadas en este depósito.

El **objetivo de este trabajo** es estudiar en detalle las asociaciones de minerales de mena de los diferentes tipos de mineralización identificados en el depósito Enterprise, sus relaciones texturales y la química mineral de las fases metálicas más abundantes. Además, este trabajo pretende establecer las distintas asociaciones minerales que permitan determinar una secuencia de etapas de formación de los minerales de mena en relación con los eventos geológicos que tuvieron lugar en el Central African Copperbelt.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1. Cinturón de Katanga

El Central African Copperbelt, o Cinturón de Katanga, se sitúa entre los cratones del Congo y del Kalahari, a ambos lados de la frontera que separa Zambia de la República Democrática del Congo. Este es un gran cinturón de pliegues y cabalgamientos con vergencia al N, conocido también como el Arco Lufiliano, que se extiende a lo largo de 700 km con una anchura superior a los 150 km (Caliteux *et al.*, 2004). Comprende los cinturones del Congo y de Zambia, así como la Provincia Noroccidental de Zambia.

Durante la fragmentación de Rodinia se generó, en el Cratón del Congo, la cuenca de Katanga a partir de una serie de rifts abortados (Cahen, 1954; Lepersonne, 1974, 1977; Álvarez, 1995; Caliteux *et al.*, 2004; Kadima *et al.*, 2011). A esta cuenca comenzaron a llegar, hace 883 Ma, materiales sedimentarios y volcánicos (Armstrong *et al.*, 2005; Kampunzu y Caliteux, 1999; Tembo *et al.*, 1999). Con la colisión del Cratón del Congo y del Kalahari durante la Orogenia Panafricana, hace entre 560 y 530 Ma (Tack *et al.*, 2010), se produjo el cierre e inversión de la cuenca, dando lugar al cinturón de Katanga o arco Lufiliano (Fig. 3) (Cahen *et al.*, 1984; Caliteux y Kampunzu, 1995; Kampunzu y Caliteux, 1999; Porada y Berhorst, 2000; Armstrong *et al.*, 2005; Batumike *et al.*, 2006). Los materiales que se depositaron en esta cuenca conforman el Supergrupo Katanga, una sucesión metasedimentaria supracortical neoproterozoica que cuenta con un espesor de 5-10 km. Esta se divide en tres unidades litoestratigráficas (François, 1995), los Grupos Roan, Nguba y Kundelungu (Caliteux *et al.*, 2004).

La gran provincia metalogénica del Central African Copperbelt alberga la mayor cantidad de recursos de Cu y Co que se conocen en el mundo, en forma de mineralizaciones alojadas en sedimentos estratificados, incluyendo numerosos yacimientos de tipo world-class (Caliteux *et al.*, 2004). Contiene unas 150 Mt de Cu, así como 3.4 Mt de Co, las mayores reservas de Co del mundo (Hitzman *et al.*, 2012; Master, 2020). Estos son, en su mayoría, depósitos hidrotermales de Cu estratificado encajados en rocas de facies reducidas situadas en la parte basal de los grupos Roan y Nguba. Suelen estar formados por sulfuros de Cu, Cu-Fe y Cu-Co. La formación de todos estos grandes depósitos se produjo durante la diagénesis de los sedimentos, gracias a salmueras mineralizantes de cuenca, y durante el metamorfismo, por la acción de fluidos metamórficos hipersalinos debido a la disolución de evaporitas. Estos fluidos disolvieron los metales que se encontraban en la cuenca derivados del basamento paleoproterozoico (Master, 2020).

Varios depósitos de Cu de gran importancia presentes en la Copperbelt, así como el depósito Enterprise, se encuentran ubicados dentro de la conocida como Región de los domos (Capistrant, 2013).

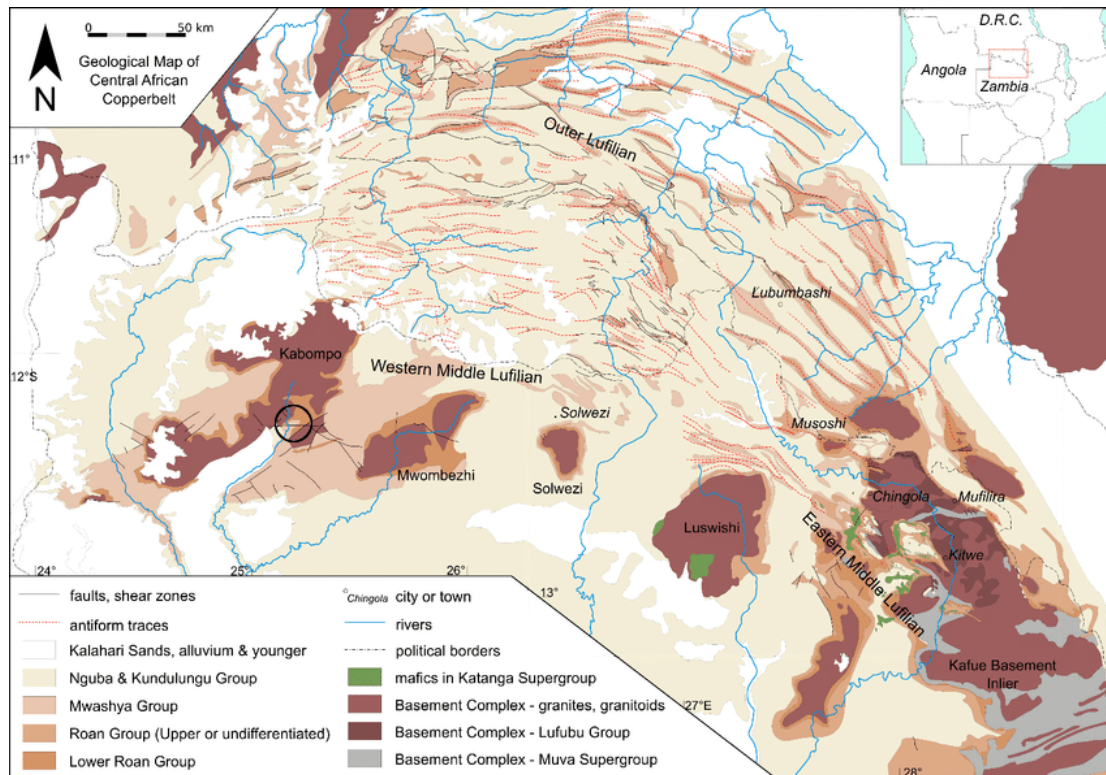


Figura 3: Mapa geológico de la zona central del Central African Copperbelt. Rodeada se encuentra la zona donde se ubica el depósito Enterprise. (Modificado de Torremans *et al.*, 2018).

2.2. Región de los domos

Dentro del cinturón de Katanga, en la Provincia Noroccidental de Zambia se encuentra la conocida como Región de los domos (Capistrant, 2013). Está formada por complejos de basamento con granitos, esquistos y orto y paragneises, que afloran debido a la existencia de anticlinales y bloques de falla, sobre los que se apoyan los materiales del supergrupo Katanga (Williams y Nisbet, 2017). Hace aproximadamente 546 Ma, durante la Orogenia Lufiliana (Steven y Armstrong, 2003), estos materiales sufrieron un metamorfismo en facies de esquistos verdes a anfibolita (Capistrant *et al.*, 2015), así como un alto grado de deformación y metasomatismo (Capistrant, 2013).

El Grupo Roan se divide en los Subgrupos Roan Inferior, Roan Superior y Mwashia (Capistrant, 2013). Sobre el Grupo Roan se encuentran los Grupos Nguba y Kundelungu, cuyos comienzos están marcado por diamictitas, el Grand Conglomerat y el Petit Conglomerat, respectivamente (Batumike *et al.*, 2007). Los dos horizontes de

diamictita registran dos eventos glaciales mundiales (Wendorff y Key, 2009), el primero de ellos hace 719-659 Ma, (Fanning y Link, 2004) y el segundo hace 650-635 Ma (Calver *et al.*, 2013; Condon *et al.*, 2005; Hoffmann *et al.*, 2004).

La provincia Noroccidental de Zambia ha sido la zona geológicamente menos estudiada del Central African Copperbelt, ya que se consideraba que sus depósitos eran de menor interés económico que los situados en los cinturones del Congo y de Zambia (Freeman, 1988). Sin embargo, la región de los domos presenta un gran número de importantes depósitos como los de Sentinel, Lumwana, Kansanshi o Enterprise. Este último se encuentra ubicado en el domo Kabompo (Capistrant, 2013).

2.3. Domo Kabompo

En la zona más occidental de la región de los domos se encuentra el domo Kabompo. Su núcleo está formado por gneises y esquistos de biotita-flogopita-moscovita paleoproterozoicos (Halley *et al.*, 2016). La estratigrafía del Supergrupo Katanga en el área este se extiende desde el Bajo Roan hasta el Grand Conglomerat (Fig. 4) (Capistrant *et al.*, 2015). Estas rocas presentan un grado metamórfico mayor que el común en el Central African Copperbelt debido a una intrusión magmática producida hace unos 735 Ma al este del domo (Halley *et al.*, 2016).

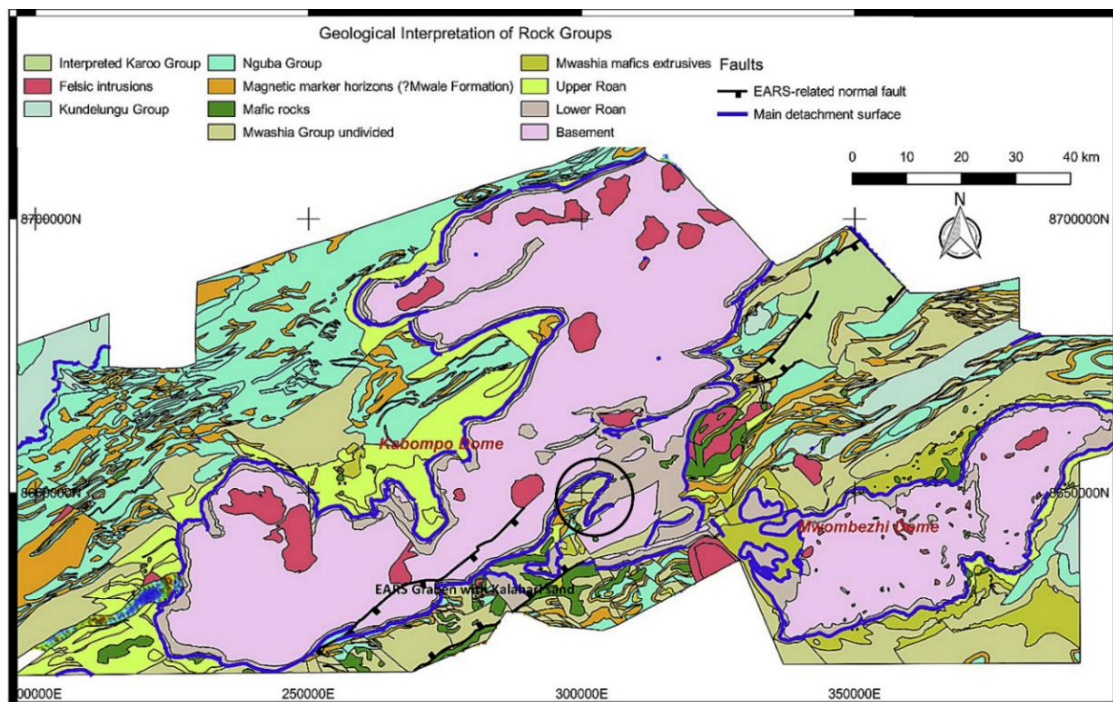


Figura 4: Mapa de las unidades litológicas y las principales estructuras del área en la que se encuentra el domo Kabompo, realizado a partir de interpretaciones geofísicas. Rodeada se encuentra la zona donde se ubica el depósito Enterprise (Williams y Nisbet, 2017).

3. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO DE ENTERPRISE

El depósito Enterprise se sitúa entre el flanco E y la charnela del domo de Kabompo, incluido en el área suroriental de la Copperbelt (Fig. 5). Esta zona presenta una serie de fallas normales de alto buzamiento y dirección NE que finalizan en profundidad al llegar al basamento. El espesor de los sedimentos aumenta hacia varias de estas fallas, lo que indica que continuaban activas en el momento de la sedimentación. Estas estructuras forman el denominado Graben Enterprise, con una anchura algo inferior a los 200 m (Capistrant *et al.*, 2015).

El basamento está formado por esquistos, paragneises y ortogneises (Klinck, 1977; Appleton, 1978; Key *et al.*, 2001) derivados de rocas ígneas, datadas con una edad de 2,22-1,83 Ga, y sedimentarias. Estas rocas sufrieron dos eventos metamórficos, el primero de ellos hace 1,9-1,8 Ga y el segundo, durante la Orogenia Lufiliana. El contacto entre el basamento y los metasedimentos del supergrupo Katanga es realmente una zona de cizalla de bajo ángulo. Los materiales neoproterozoicos presentan evidencias de haber sido afectados por metasomatismo rico en Mg debido a fluidos profundos que circularon a través de este contacto (Capistrant *et al.*, 2015).

Los materiales que conforman el depósito Enterprise son los pertenecientes al Grupo Roan. El Subgrupo Roan Inferior, localmente denominado Formación Wushingwi (Gray *et al.*, 2020), presenta una secuencia siliciclástica basal granodecreciente formada por conglomerados hematíticos, areniscas y limolitas metamorfizadas, cuyo espesor varía lateralmente desde los 100 m hasta superar los 500 m. La unidad predominante de esta secuencia es una roca bandeada formada por arenisca limosa y limolita rica en cuarzo, que alcanza espesores superiores a los 250 m. Sobre la secuencia siliciclástica se sitúa una secuencia heterogénea y lateralmente discontinua formada por alternancias de metalimolitas, metaareniscas, rocas laminadas ricas en cuarzo de color gris oscuro, rocas carbonáceas negras ricas en cuarzo, mármol y rocas ígneas máficas metamorfizadas. Estas rocas constituyen la nombrada como secuencia Graben Enterprise (por FQM), equivalente al "Ore Shale" del Copperbelt de Zambia (Capistrant *et al.*, 2015).

Las metalimolitas de la secuencia Graben Enterprise están formadas principalmente por cuarzo, talco y cianita y pasan lateralmente a metaareniscas masivas ricas en cianita. La roca laminada rica en cuarzo es una limolita que presenta un bandeo milimétrico formado por capas oscuras de cuarzo, flogopita, cianita y plagioclasa, y capas claras de

cuarzo y cianita. Esta unidad se encuentra atravesada por venas de cianita-cuarzo de anchuras milimétricas a centimétricas que pueden contener sulfuros. La roca laminada rica en cuarzo pasa gradualmente a mármol y rocas carbonáceas (Capistrant *et al.*, 2015). Las rocas carbonáceas ricas en cuarzo están compuestas por cuarzo y cianita con materia carbonácea intersticial y en forma de láminas delgadas. Presenta un valor de TOC de entre el 9 y el 17% (Capistrant, 2013). Comúnmente presentan venas transversales de cuarzo-cianita (Capistrant *et al.*, 2015). Los mármoles están formados por dolomita, con cantidades menores de magnesita, flogopita y clorita. Todos estos materiales del Subgrupo Roan Inferior presentan cambios litológicos laterales rápidos a lo largo de las fallas que atraviesan el área del depósito (Capistrant *et al.*, 2015).

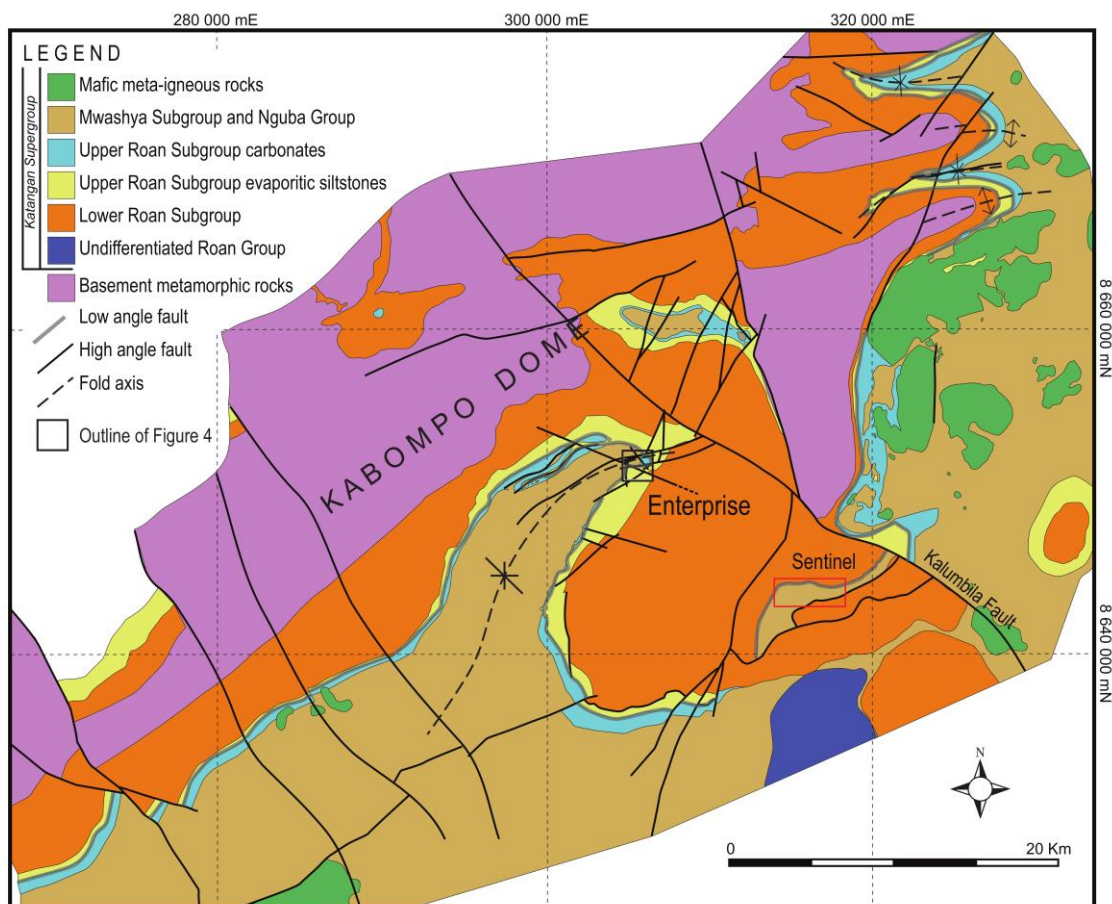


Figura 5: Mapa geológico de la zona oriental del domo Kabompo que muestra la localización del depósito Enterprise. (Capistrant *et al.*, 2015).

El Subgrupo Roan Superior, localmente denominado Formación Wamikumbi (Gray *et al.*, 2020), lo conforman una brecha y una secuencia de materiales carbonáticos. La brecha, limitada por zonas de cizalla de bajo ángulo (Capistrant *et al.*, 2015), se interpreta como el reemplazamiento de un diapiro de halita-anhidrita derivado de la halocinesis de depósitos evaporíticos (Hitzman *et al.*, 2012). La brecha se encuentra cubierta por mármol (Capistrant *et al.*, 2015).

Las fallas de tendencia NE que ocupan gran parte del depósito no afectan a la brecha del Subgrupo Roan Superior, sin embargo, existen una serie de fallas con tendencia NO y un alto buzamiento que afectan a las zonas de cizalla de bajo ángulo de la base de la brecha y del contacto entre el basamento y los sedimentos (Capistrant *et al.*, 2015). Ambas zonas de cizalla son de edad Lufiliana, paralelas al tejido metamórfico (John *et al.*, 2004).

La parte superior del Grupo Roan la constituye el Subgrupo Mwashia (Capistrant *et al.*, 2015), localmente conocido como Formación Luigishi (Gray *et al.*, 2020), representado por metalimolitas filíticas muy meteorizadas (Capistrant *et al.*, 2015). Desde la secuencia siliciclástica del Roan Inferior hasta la base del subgrupo Mwashia se encuentran rocas metaígneas máficas, aunque son más comunes en la secuencia de Graben Enterprise, así como en el interior y adyacentes a la brecha del Roan Superior. Su mineralogía sugiere que son flujos o sills ígneos máficos afectados por metamorfismo y metasomatismo (Capistrant *et al.*, 2015), originados por un vulcanismo que tuvo lugar hace entre 765 y 735 Ma (Key *et al.*, 2001) (Fig. 6).

El depósito Enterprise alberga una mineralización de origen hidrotermal asociado a procesos sinsedimentarios, diagenéticos tempranos y diagenéticos tardíos (Caliteux *et al.*, 2004) y a profundas estructuras de régimen extensional. El depósito presenta una zona rica en Ni, bajo la cual, a unos 350 m de profundidad, se encuentra una zona rica en Cu (Gray *et al.*, 2020).

Los minerales primarios que conforman las áreas mineralizadas de Ni son vaesita (NiS_2), pentlandita ($(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$), millerita (NiS), pirita niquelífera ($[\text{Fe}, \text{Ni}]\text{S}_2$), bravoita ($[\text{Ni}, \text{Fe}]\text{S}_2$) y carrolita ($\text{Cu}[\text{Co}, \text{Ni}]_2\text{S}_4$). La mineralización primaria de Cu está constituida principalmente por calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y calcosina (Cu_2S), con leyes que llegan a alcanzar el 2,80 % de Cu (Gray *et al.*, 2020). Los sulfuros se presentan en forma de diseminaciones, venas (Gray *et al.*, 2020) y reemplazamientos semimasivos (Capistrant, 2013).

La mineralización se encuentra albergada en las rocas del Subgrupo Roan Inferior. En la zona rica en Ni, la mineralización suele encontrarse en la roca carbonatada negra, en la limolita rica en cuarzo (Gray *et al.*, 2020) y en el mármol de la secuencia Graben Enterprise (Capistrant, 2013). Estas unidades presentan pliegues recumbentes y, en el caso de las lutitas, un engrosamiento estructural, producidos durante un cizallamiento lufiliano y replegados por una fase de plegamiento vertical posterior (Gray *et al.*, 2020).

La mineralización rica en Cu aparece en las metalimolitas de la secuencia siliciclástica basal (Capistrant, 2013).

Las rocas que albergan la mineralización presentan una importante alteración, con cuarzo, talco, cianita o magnesita. Los cambios mineralógicos producidos en la roca limolítica rica en cuarzo resultaron en un contraste reológico que generó morfologías lobulares al producirse la compresión de los materiales, como la que caracteriza a este depósito (Gray *et al.*, 2020).

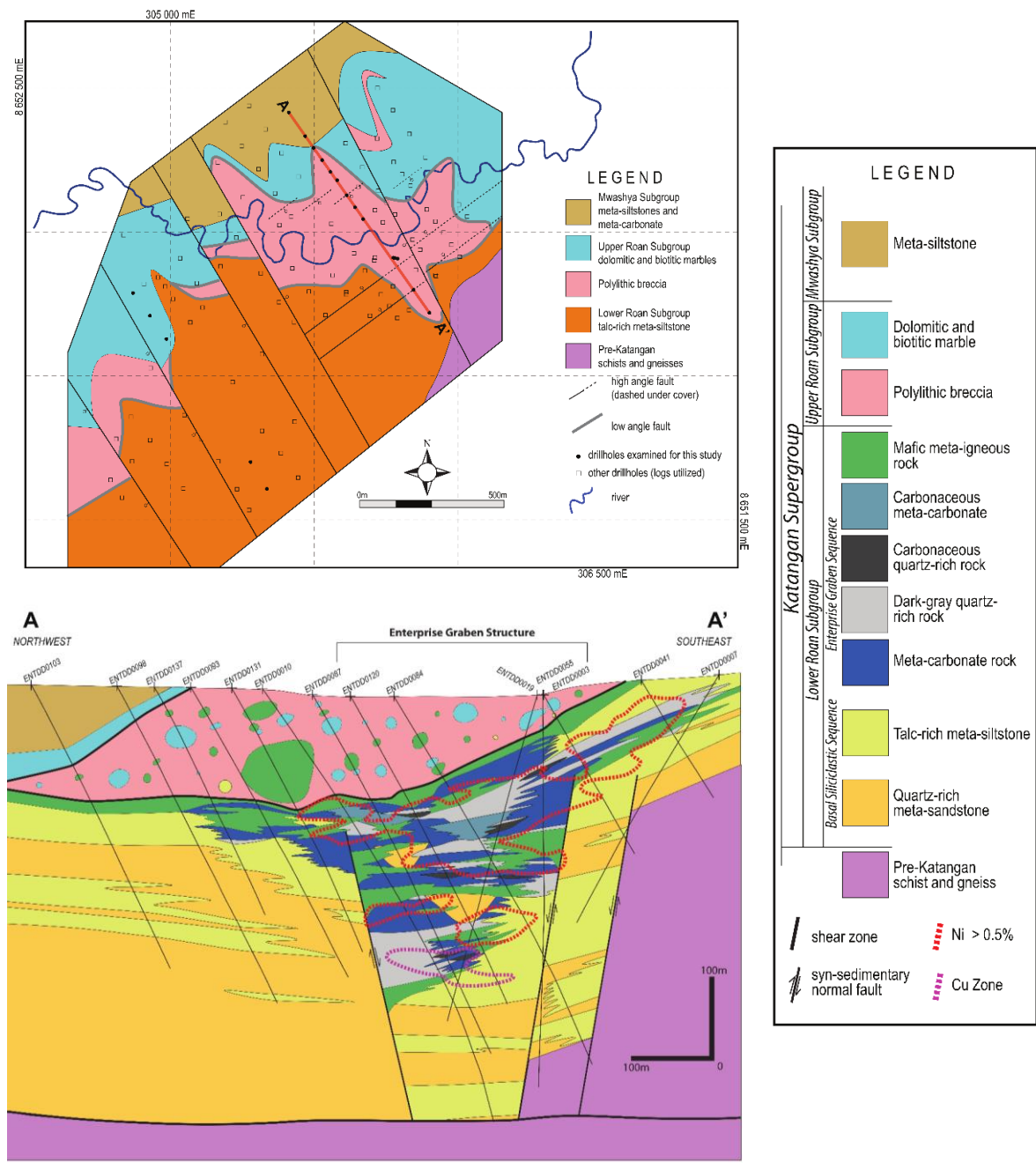


Figura 6: Mapa y corte geológico del área de depósito Enterprise, mostrando la estratigrafía, las estructuras, los sondeos realizados y la localización de la mineralización. (Capistrant *et al.*, 2015).

4. METODOLOGÍA

El estudio de las mineralizaciones que conforman el depósito Enterprise se ha llevado a cabo mediante el uso de métodos macroscópicos, microscópicos y microanalíticos, a partir de muestras obtenidas del sondeo ENT-175, realizado en el área del depósito y proporcionadas por la Dra. Lola Yesares. Las técnicas utilizadas han sido microscopía óptica de reflexión y transmisión, microscopía electrónica de barrido (SEM), empleando electrones retrodispersados y espectroscopia de rayos X por dispersión en energía (EDX) y microsonda electrónica.

Para este trabajo se han estudiado un total de 11 muestras del sondeo ENT-175. Para los análisis microscópicos y microanalíticos se ha contado con ocho probetas y cinco láminas delgadas pulidas, obtenidas de los fragmentos de testigo (Fig. 7). Las probetas se corresponden a profundidades de 177.8 m, 151 m, 148.8 m, 115.6 m, 115.8 m, 106m, 100.4 m y 93 m. Las láminas delgadas se obtuvieron a partir de los fragmentos situados a 177.8 m, 151 m, 141.7 m, 129 m y 125.5 m.

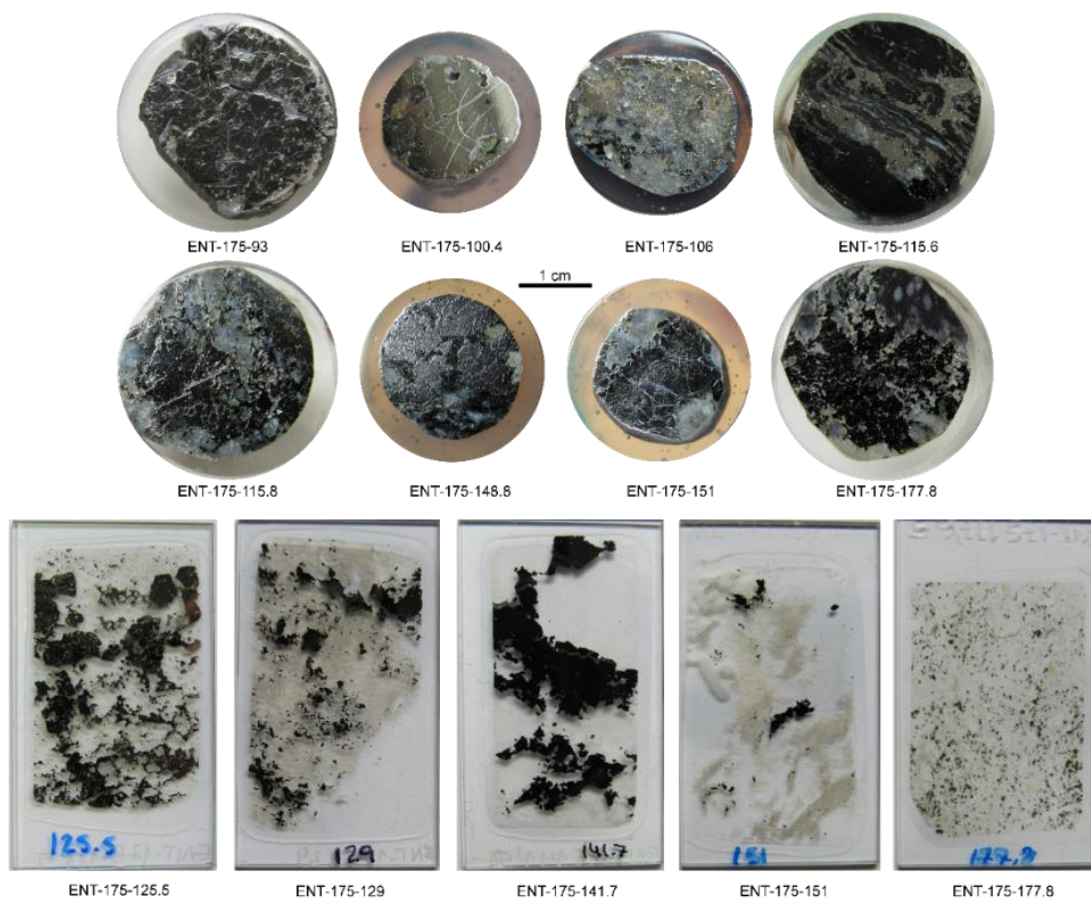


Figura 7: Probetas y láminas utilizadas en microscopía.

En primer lugar, se ha realizado un estudio mineralógico y textural de las muestras mediante el uso del microscopio petrográfico de luz reflejada y transmitida Nikon ECLIPSE Ci-POL® con objetivos de 5X, 10X, 20X y 50X, del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM.

Seguidamente, para un estudio más detallado de la mineralogía y sus texturas, las muestras se han estudiado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta tarea se ha llevado a cabo con un microscopio JEOL JSM 6335F en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica. Con esta técnica, se han obtenido imágenes composicionales de electrones retrodispersados y se han realizado análisis elementales cualitativos de los distintos minerales mediante la detección de rayos X de energía dispersiva. Las muestras fueron previamente cubiertas por una capa de grafito y se empleó una intensidad de 20 kV. Una vez obtenidos los datos, estos han sido tratados mediante el programa INCA (ETAS, 2010).

Para estudiar la química mineral de los sulfuros mayoritarios se ha empleado una microsonda electrónica modelo JOEL Superprobe JXA-8900M del Centro Nacional de Microscopía Electrónica, operando a 20 kV con una intensidad de corriente de 5×10^{-8} A y un diámetro de haz de entre 0 y 5 μm (en función del punto a analizar). Los elementos analizados fueron Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb, Bi, As, Sb y Te.

Todos los datos obtenidos de los distintos análisis y las observaciones han sido estudiados y comparados con la información bibliográfica existente con el fin de poder determinar las distintas relaciones entre los minerales de mena y determinar la secuencia paragenética de la mineralización del depósito Enterprise.

5. RESULTADOS

5.1. Estilos de mineralización

Por medio de las observaciones macroscópicas realizadas en los distintos testigos se han identificado tres estilos de mineralización diferentes en función de su mineralogía, textura y roca encajante: mineralización semimasiva, diseminada y en venas (Fig. 8).

- Mineralización semimasiva

La mineralización se presenta en forma de reemplazamientos semimasivos o rellenando huecos en mármol (Fig. 8a), en rocas calcosilicatadas con textura granoblástica formadas por carbonato y filosilicatos de color oscuro (Fig. 8b), y en el contacto entre mármol y metabasita (Fig. 8c). Este estilo de mineralización se da en las cotas inferiores y superiores del sondeo estudiado.

Los minerales que constituyen la mineralización son pirita, millerita, vaesita, calcopirita, violarita, pentlandita, galena, magnetita e ilmenita. Se encuentra formada principalmente por agregados masivos de cristales de pirita reemplazados por millerita, mineral que es a su vez reemplazado por calcopirita y violarita. También son comunes los agregados masivos de cristales de vaesita reemplazados parcialmente por pirita, calcopirita y galena. La magnetita aparece como agregados masivos de cristales, sin encontrarse asociado a ningún otro mineral metálico.

- Mineralización diseminada

Los sulfuros están rellenando huecos en rocas calcosilicatadas de textura granoblástica reemplazando a otros minerales (Fig. 8d) y en rocas silicatadas de color gris oscuro con nódulos milimétricos de cianita (Fig. 8e). Este tipo de mineralización predomina en las cotas intermedias, aunque también aparece en menor proporción a lo largo de toda la longitud del sondeo estudiado.

Los minerales que constituyen la mineralización son pirita, millerita, vaesita, calcopirita, polidimita, violarita, pentlandita e ilmenita. Suelen aparecer cristales de pirita junto con cristales de pentlandita reemplazados por millerita, que a su vez es reemplazada por violarita. Este estilo de mineralización también se presenta constituido por agregados masivos cristalinos de vaesita, mineral que es reemplazado parcialmente por pirita,

polidimita o calcopirita. Existen zonas constituidas casi en su totalidad por pirita, en forma de agregados masivos de cristales y de framboides recrystalizados, junto a ilmenita en forma de cristales euhedrales.

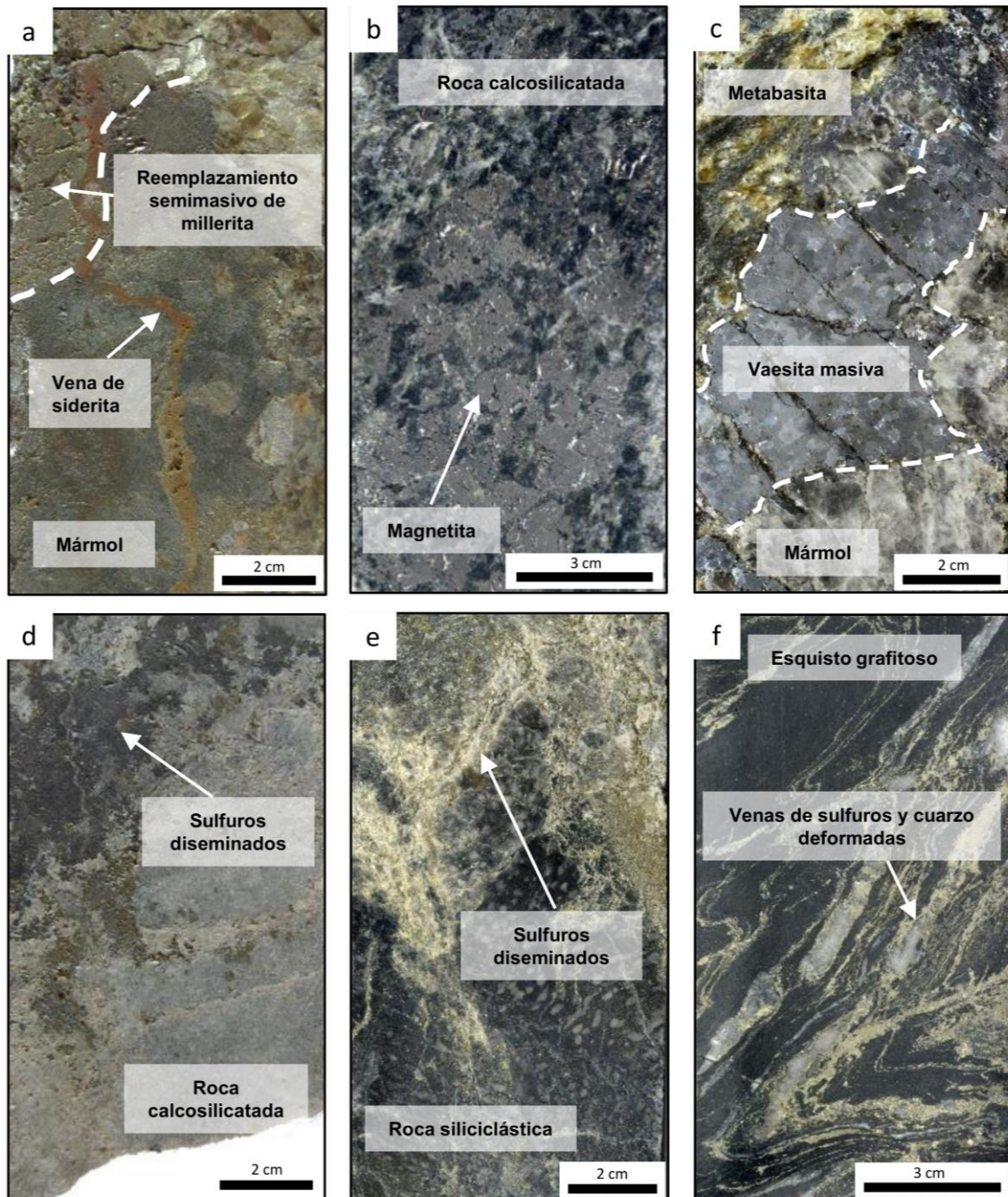


Figura 8: Imágenes de distintos testigos del sondeo ENT-175 donde se identifican las distintas litologías y estilos de mineralización. (a) Testigo a 100.4 m de profundidad en el que se muestra la mineralización en forma de reemplazamiento semimasivo de millerita, en mármol, atravesado por una vena de siderita. (b) Testigo a 148.8 m de profundidad mostrando mineralización semimasiva formada por magnetita en roca calcosilicatada. (c) Testigo a 151 m de profundidad en el que se muestra la mineralización semimasiva de vaesita, en el contacto entre mármol y metabasita. (d) Testigo a 141.7 m de profundidad en el que se muestra la mineralización en forma de sulfuros diseminados en roca calcosilicatada. (e) Testigo a 177.8 m de profundidad con mineralización en forma de sulfuros diseminados en roca siliciclástica. (f) Testigo a 115.6 m de profundidad en el que se muestra la mineralización en forma venas de cuarzo y sulfuros deformadas en esquistos grafitoso.

- Mineralización en venas

Los minerales que conforman este estilo de mineralización se presentan rellenando, junto con cuarzo, venas cuyo grosor no supera los 7 mm, que cortan esquistos grafitosos de color negro. Estas venas están deformadas, ya que aparecen replegadas (Fig. 8f). La mineralización en venas se observa únicamente en las cotas intermedias del testigo del sondeo estudiado.

Este estilo de mineralización está constituido principalmente por pirita y millerita, y proporciones menores de calcopirita, violarita, ilmenita y pentlandita. En esta clase de mineralización se observan agregados masivos de cristales de pirita reemplazados por millerita, mineral que es a su vez reemplazado por calcopirita y violarita. Entre estos minerales aparecen cristales euhedrales de ilmenita.

5.2. Mineralogía

Las mineralizaciones estudiadas del depósito Enterprise están formadas principalmente por pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), millerita (NiS), vaesita (NiS_2), polidimita (NiNi_2S_4), violarita (FeNi_2S_4) y pentlandita ($(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$), y en menor proporción, se han identificado galena (PbS), magnetita (Fe_3O_4) e ilmenita (FeTiO_3) (Figs. 9 y 10). Las distintas composiciones minerales, diferenciadas en función del tipo textural, obtenidas a partir de análisis de microsonda electrónica, se muestran en el Anexo. La Tabla 1 muestra un resumen de los valores obtenidos para cada mineral, sin diferenciar tipos texturales, ya que no se observan variaciones significativas en ellos.

- Pirita (FeS_2)

La pirita es el mineral más abundante en la mineralización, junto con millerita y vaesita, y está presente a lo largo de todo el sondeo, en todos los estilos de mineralización, incluyendo semimasiva, diseminada y en venas (Fig. 8a-f).

La manera más común en la que se presenta es en forma de agregados masivos de cristales subeuhedrales, fracturados, y con bordes de grano corroídos, llegando a presentar textura en caries debido al reemplazamiento por millerita o calcopirita, quienes rellenan sus oquedades y fracturas (Fig. 9a-d). La pirita también se encuentra rellenando oquedades y fracturas en vaesita. Algunas de estas fracturas presentan en sus paredes cristales euhedrales bien definidos de pirita (Fig. 9e). Localmente, aparece

reemplazando a pentlandita (Fig. 9f) y siendo reemplazada por polidimita (Fig. 9g) y galena (Fig. 9h). También de manera puntual, se han observado framboides de pirita recristalizados (Fig. 10a).

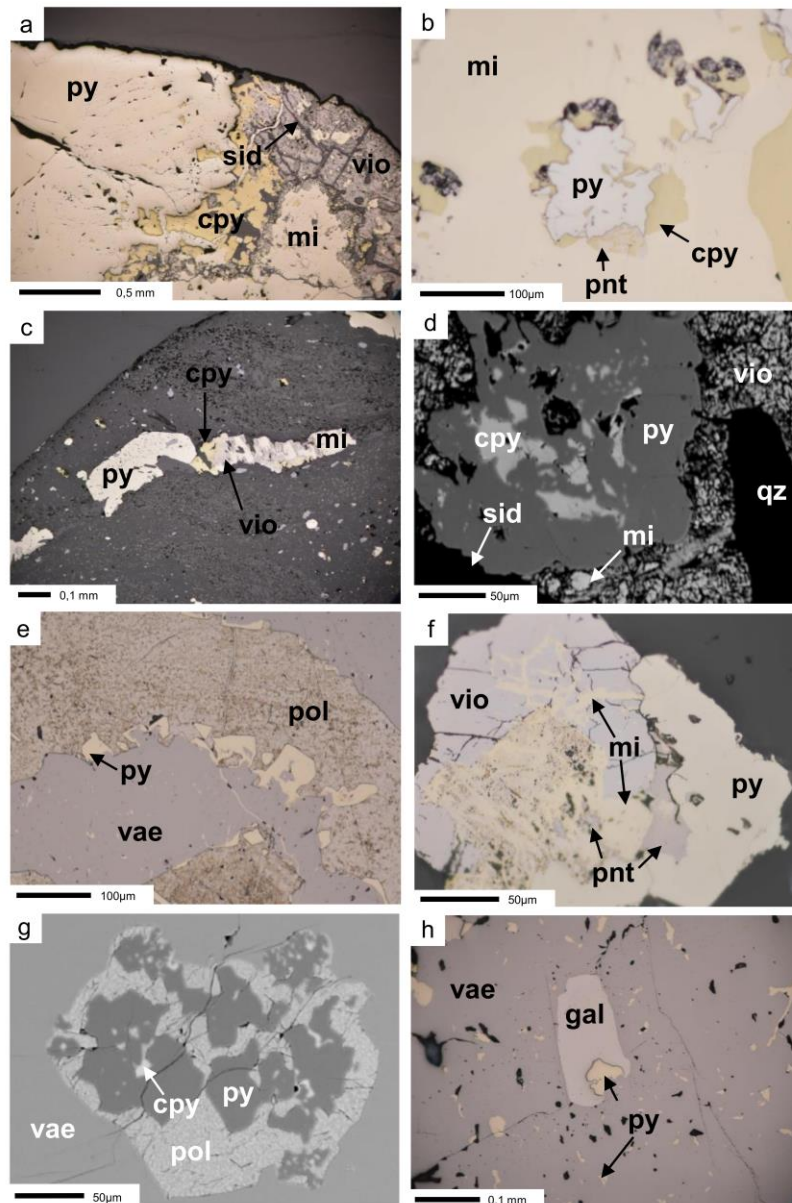


Figura 9: Imágenes de microscopía óptica y de electrones retrodispersados (ER) de las distintas muestras analizadas (py = pirita, mi = millerita, cpy = calcopirita, vae = vaesita, pol = polidimita, vio = violarita, pnt = pentlandita, il = ilmenita, gal = galena, sid = siderita, qz = cuarzo). (a) ENT-175-100.4 Agregado masivo poroso de pirita reemplazado parcialmente por calcopirita y millerita. La millerita se ve parcialmente reemplazada por violarita, mineral reemplazado por siderita a favor de sus planos de exfoliación. (b) ENT-175-100.4 Pirita con textura en caries debido al reemplazamiento por millerita y calcopirita. El agregado masivo de millerita se ve parcialmente reemplazado por calcopirita, mineral que también reemplaza a pentlandita. (c) ENT-175-115.6 Agregado de pirita, calcopirita y millerita, esta última reemplazada por violarita. (d) ENT-175-106 ER Pirita con textura en caries debido al reemplazamiento por millerita, que se encuentra reemplazada por violarita. La calcopirita ocupa las oquedades de la pirita. Este agregado de cristales se encuentra rodeado por siderita. (e) ENT-175-141.7 Fractura en agregado masivo de vaesita rellena por cristales euhedrales de pirita en los bordes de la fractura y por polidimita en su interior. (f) ENT-175-115.8 Relictos de pentlandita reemplazada por pirita y millerita. A su vez la millerita es reemplazada por violarita. (g) ENT-175-141.7 Pirita reemplazada por polidimita en agregado masivo de vaesita. Las oquedades de la pirita se encuentran ocupadas por calcopirita. (h) ENT-175-151p Pirita reemplazada por galena ocupando la porosidad de un agregado masivo de vaesita.

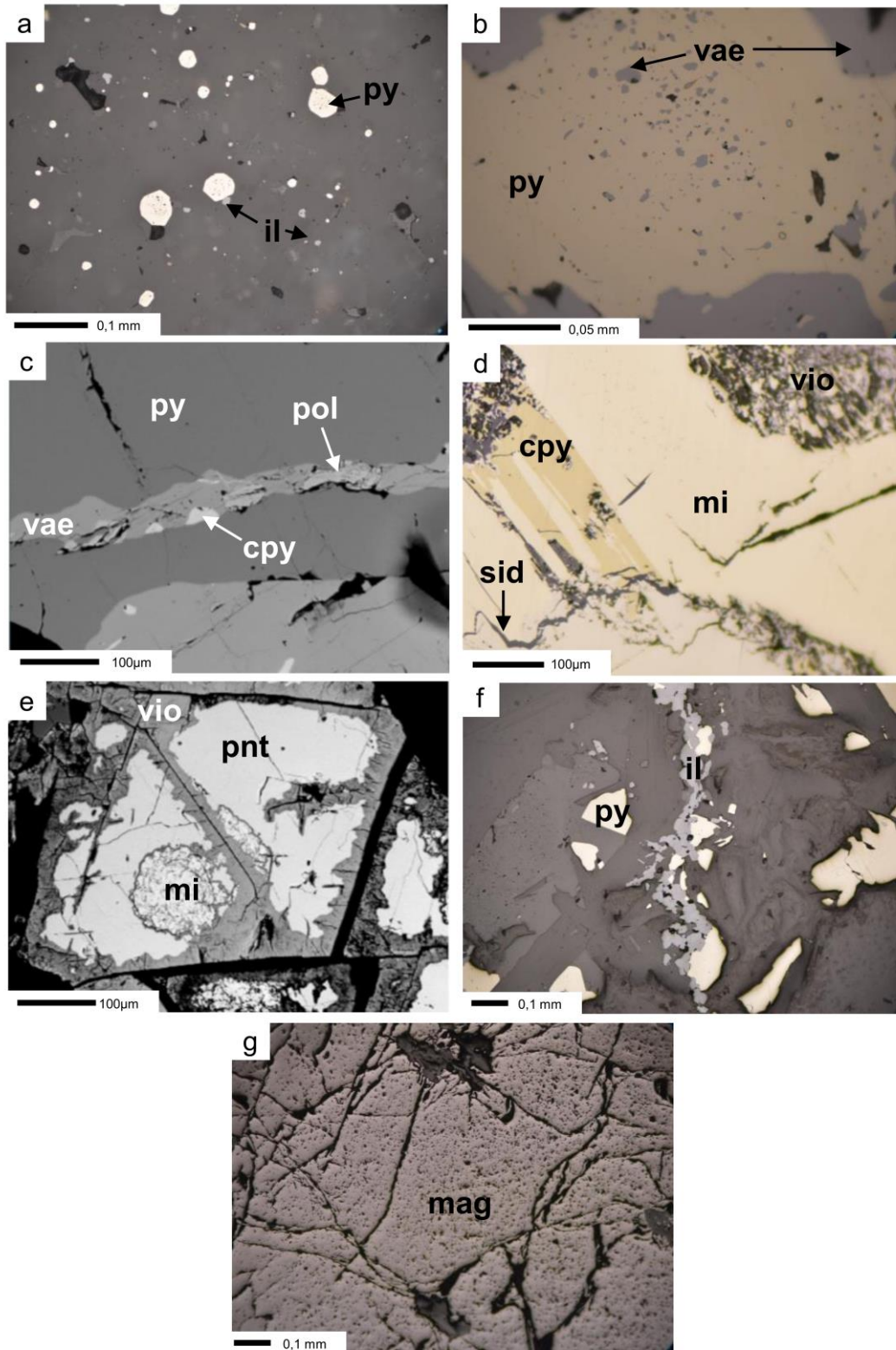


Figura 10: Imágenes de microscopía óptica y de electrones retrodispersados (ER) de las distintas muestras analizadas (py = pirita, mi = millerita, cpy = calcopirita, vae = vaesita, pol = polidimita, vio = violarita, pnt = pentlandita il = ilmenita, mag = magnetita). (a) ENT- 175-177.8p Framboides recrystalizados de pirita y cristales aislados de ilmenita. (b) ENT-175-151l Agregado de pirita poroso cuya porosidad está ocupada por vaesita.(c) ENT-175-141.7 Agregado masivo de pirita que presenta una fractura rellena de vaesita, con cantidades menores de calcopirita y polidimita. (d) ENT-175-100.4 Calcopirita reemplazando a millerita a favor de sus planos de exfoliación, reemplazamiento de millerita por violarita y vena de siderita cortando la muestra. (e) ENT-175-125 ER Pentlandita reemplazada por millerita y violarita a favor de fracturas. (f) ENT-175-177.8l Agregados cristalinos de ilmenita en contacto con pirita. (g) ENT-175-148.8 Agregado masivo de magnetita.

Se han analizado mediante microsonda electrónica distintos tipos de piritas: masivas, reemplazadas por millerita, reemplazando a pentlandita y rellenando oquedades en vaesita. Los análisis químicos obtenidos muestran que estas piritas presentan contenidos de Fe que oscilan entre 43,73 % y 46,31 % en peso, y de S comprendidos entre los 52,19 % y 54,56 % en peso, sin presentar variaciones significativas entre los distintos tipos (Fig.11). Los principales elementos traza presentes en este mineral son, en orden de abundancia, Ni (promedio de 0,724% en peso), Mo (promedio de 0,657% en peso), Co (promedio de 0,395% en peso), Pb (promedio de 0,22% en peso), Bi (promedio de 0,126% en peso), Sb (promedio de 0,01% en peso) y Te (promedio de 0,01% en peso) (Fig. 12).

Los valores de concentración de Co son elevados, entre 1.210 ppm y 7.610 ppm, con un valor medio de 3.950 ppm. En el caso del Ni, el rango de valores es muy amplio, comprendido entre 410 ppm y 3,45% en peso. Su valor medio se sitúa en 7.240 ppm. Los valores de Ni son, por lo general, mayores en las piritas que se encuentran asociadas a vaesita (Fig. 9e, g-h; Fig. 10b-c y Anexo).

- Millerita (NiS)

La millerita es, junto con pirita y vaesita, uno de los minerales más abundantes de la mineralización. Aparece entre los 93 m y los 125.5 m y entre los 151 m y los 177.8 m del sondeo, en todos los estilos de mineralización, semimasiva, diseminada y en venas (Fig. 8a-c, e-f).

Suele estar asociada a calcopirita, mineral que en ocasiones reemplaza parcialmente a la millerita (Fig. 9b y Fig. 10d). Suele aparecer rellenando oquedades y fracturas en pirita, siendo muy comunes los reemplazamientos parciales y totales de este mineral (Fig. 9a-d). Estos reemplazamientos originan agregados cristalinos subeuhedrales masivos de millerita (Fig. 9a-b y Fig. 10d). También se encuentra reemplazando cristales de pentlandita, mostrando en ocasiones una textura ``oquerosa/porosa`` (Fig. 9f y Fig. 10e). Los reemplazamientos por violarita son muy comunes en este mineral (Fig. 9a-c, f).

Los análisis químicos de microsonda muestran que el contenido en Ni de las milleritas se encuentra comprendido entre 59,83 % y 63,53 % en peso, y el contenido en S entre 32,53 % y 36,60 % en peso (Fig.11). Esto muestra que los valores de concentración de

los elementos mayores que forman el mineral son muy similares a los de la composición estequiométrica.

En relación a los elementos menores presentes en la millerita, el contenido en Fe es muy elevado, con un valor medio de 1,57 % en peso, aunque llega a alcanzar el 2,64 % (Fig. 12). Los valores más altos de Fe se observan en las milleritas que se encuentran reemplazando cristales de pirita y de pentlandita (Fig. 9a, c-d, f-g). El Co aparece con concentraciones de hasta 730 ppm, con un valor medio de 250 ppm, con los valores más altos en las milleritas que reemplazan a pirita (Fig. 12) (Anexo). Además, las milleritas contienen cantidades trazas de Mo (promedio de 0,47% en peso), As (promedio de 0,007% en peso), Pb (promedio de 0,131% en peso), Bi (promedio de 0,086% en peso), Sb (promedio de 0,065% en peso) y Te (promedio de 0,736% en peso) (Fig. 12).

- Calcopirita (CuFeS_2)

La calcopirita aparece en todos los estilos de mineralización, incluyendo semimasiva, disseminada y en venas, en proporciones que no superan el 10% del total de sulfuros (Fig. 8a-c, e-f).

Este mineral suele encontrarse asociado a millerita (Fig. 9a-c, Fig. 10d). Es común que aparezca rellenando oquedades y fracturas en pirita, en ocasiones reemplazándola parcialmente (Fig. 9a, d, g), así como reemplazando parcialmente cristales de millerita (Fig. 9b y Fig. 10d). De forma menos habitual, se presenta rellenando oquedades y fracturas en vaesita (Fig. 10c) y reemplazando a pentlandita. En algunas zonas es reemplazada por violarita (Fig. 9a).

A partir de los datos obtenidos mediante la microsonda electrónica se observa que las calcopiritas presentan composiciones prácticamente estequiométricas de S, Cu y Fe (30,43% en peso, 34,63% en peso y 30,43% en peso, valores promedio, respectivamente). El elemento traza más relevante es el Co, con concentraciones que varían entre 190 y 550 ppm y un valor medio de 350 ppm. Además, se han identificado como trazas Mo (promedio de 0,473% en peso), Co (promedio de 0,035% en peso), Ni (promedio de 0,099% en peso), Pb (promedio de 0,142% en peso), Bi (promedio de 0,077% en peso), Zn (promedio de 0,027% en peso), Sb (promedio de 0,032% en peso) y Te (promedio de 0,015% en peso) (Fig. 12).

- Vaesita (NiS_2)

La vaesita se ha identificado en las mineralizaciones de tipo diseminada y semimasiva (Fig. 8a, c, e-f).

Se presenta en forma de agregados masivos, con textura porosa y reemplazados por pirita, calcopirita, polidimita, millerita y galena (Fig. 9e, g-h y Fig. 10c). Puntualmente se encuentra relleno de fracturas y oquedades en pirita (Fig. 10 b-c).

El contenido de Ni y S en las vaesitas, analizado por medio de microsonda electrónica, no presenta grandes variaciones. Los valores de contenido de Ni oscilan entre 42,79 % y 45,89 % en peso, y los de S, entre 51,56 % y 52,94 % en peso (Fig. 10). El contenido en Fe es muy elevado, con un valor medio de 1,94 % en peso, aunque llega a alcanzar el 2,98 %. Los valores de concentración de Co varían entre valores inferiores al límite de detección y 1.780 ppm, con un valor medio de 1.186 ppm (Fig. 12). Los elementos traza presentes en la vaesita son Mo (promedio de 0,671% en peso) Pb (promedio de 0,198% en peso), Bi (promedio de 0,144% en peso), Sb (promedio de 0,047% en peso) y Te (promedio de 0,55% en peso) (Fig. 12).

- Polidimita (Ni_3S_4)

Este mineral solo se ha identificado en la mineralización de tipo diseminado (Fig. 8 c). Se observa claramente asociado a vaesita relleno de fracturas y oquedades (Fig. 9e, g y Fig. 10c). Estas fracturas en ocasiones presentan cristales euhedrales de pirita en las paredes y el espacio central de la fractura queda relleno por polidimita (Fig. 10c). También aparece reemplazando parcialmente cristales de pirita (Fig. 9g).

Mediante los análisis químicos de microsonda se ha podido determinar que, en este mineral, el contenido de Ni oscilan entre 50,51 % y 53,36 % en peso, y el de S, entre 36,92 % y 42,44 % en peso (Fig. 11). Presenta un contenido bastante elevado de Fe, con un valor medio de 3,11 % en peso, aunque llega a alcanzar el 5,06 %. Los valores de concentración de Co varían entre 450 y 8.550 ppm, con una concentración media de 2.700 ppm (Fig. 12). Además de Fe y Co, la polidimita contiene cantidades menores de Mo (promedio de 0,529% en peso), Pb (promedio de 0,154% en peso), Bi (promedio de 0,128% en peso), Sb (promedio de 0,038% en peso) y Te (promedio de 0,622% en peso) (Fig. 12).

- Violarita (FeNi_2S_4)

La violarita se ha identificado en todos los estilos de mineralización, semimasiva, diseminada y en venas (Fig. 8 a-c, e). La violarita aparece como mineral de reemplazamiento principalmente asociado a millerita, por lo que su presencia se limita a zonas en las que se encuentra este mineral.

La violarita reemplaza principalmente a millerita (Fig. 9a, c-d, f, aunque localmente reemplaza también a calcopirita (Fig. 9a) y pentlandita (Fig. 10e). Este reemplazamiento se produce a favor de fracturas y bordes de los cristales. En general, los cristales de violarita suelen presentar un tamaño de grano muy pequeño, menor de 30 μm , lo que les otorga un aspecto "sucio" (Fig. 9a, d). Este mineral está asociado a carbonatos, los cuales reemplazan a la violarita a favor de los planos de exfoliación (Fig. 9a).

Los análisis químicos de microsonda electrónica realizados en violaritas muestran concentraciones de sus principales elementos muy variadas. La concentración de Fe varía entre 10,37 % y 17,97 % en peso, la de Ni, entre 34,71 % y 45,27 % en peso, y la de S entre 37,08 % y 42,08 % en peso (Fig.10). Las concentraciones de Co son relativamente altas, oscilando entre 410 ppm y 4.110 ppm, con un valor medio de 1.130 ppm. Además, se han analizado otros elementos trazas como Mo (promedio de 0,531% en peso), Pb (promedio de 0,149% en peso), Bi (promedio de 0,098% en peso), Sb (promedio de 0,038% en peso) y Te (promedio de 0,488% en peso) (Fig. 12).

- Pentlandita ($(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$)

Se ha identificado en mineralizaciones de estilo diseminado y en venas (Fig. 8b, c, f). Aparece como cristales muy corroídos debido a que sufre reemplazamientos por pirita, calcopirita, millerita y violarita (Fig. 9f y Fig. 10e).

Los análisis químicos de microsonda muestran que las pentlanditas presentan concentraciones de sus principales elementos muy variables. La concentración de Fe varía entre 24,13 % y 25,55 % en peso, la de Ni, entre 39,81 % y 40,76 % en peso, y la de S entre 32,74 % y 33,38 % en peso (Fig.11). Los valores de concentración de Co varían entre las 330 ppm y las 820 ppm, con un valor medio de 540 ppm. Además, se han identificado como trazas Mo (promedio de 0,417% en peso), Co (promedio de 0,054% en peso), Pb (promedio de 0,113% en peso), Bi (promedio de 0,086% en peso), Sb (promedio de 0,037% en peso) y Te (promedio de 0,461% en peso) (Fig. 12).

- Galena (PbS)

La galena solamente se ha identificado en la mineralización de tipo semimasivo (Fig. 8e). Aparece reemplazando a la pirita que se encuentra rellenando las oquedades de la vaesita (Fig. 9h).

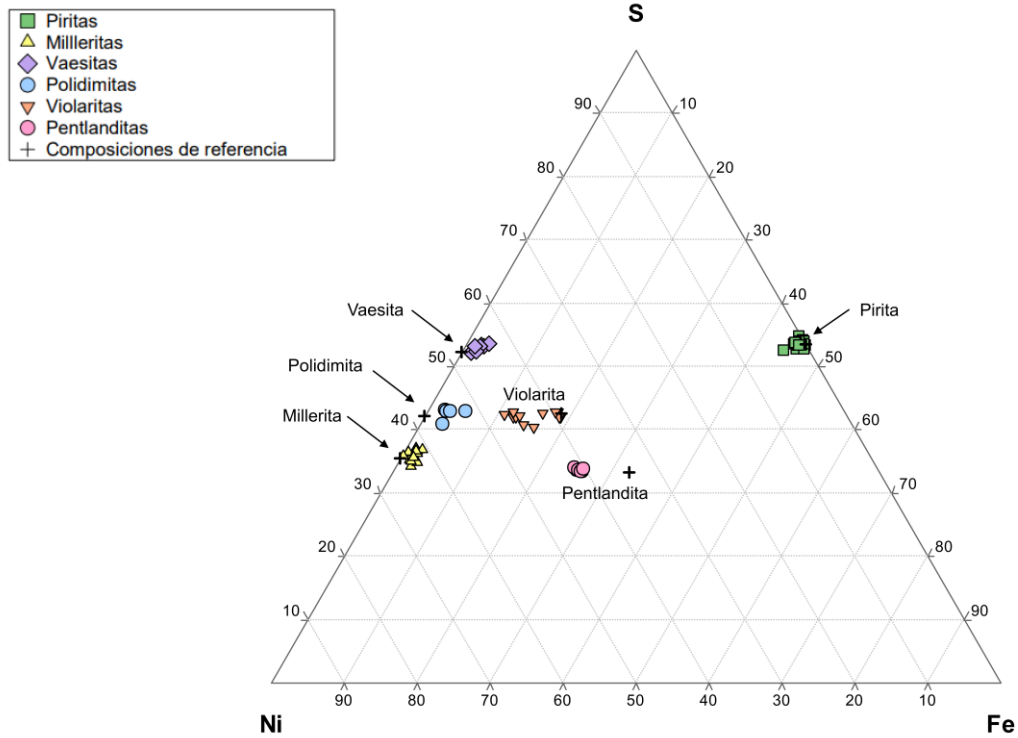


Figura 11: Diagrama triangular Fe-Ni-S en el que se muestran las concentraciones de los elementos principales de los sulfuros de Fe, Ni y Fe-Ni analizados mediante microsonda, así como la composición de referencia para cada uno de estos minerales.

- Ilmenita (FeTiO_3)

La ilmenita se encuentra en todos los estilos de mineralización (Fig. 8a-c, f). Aparecen como pequeños cristales euhedrales rodeados por minerales transparentes, por pirita, por millerita o por vaesita (Fig. 10a, f).

- Magnetita (Fe_2O_4)

La magnetita solamente se ha identificado en la mineralización de tipo semimasivo (Fig. 8d). Se presenta como agregados masivos de cristales fracturados y muy porosos (Fig. 10g).

% en peso	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb	Bi	As	Sb	Te	S
Pirita												
Min	43,731	0,121	0,041	<ILD	<ILD	0,601	0,185	0,062	<ILD	<ILD	<ILD	52,188
Máx	46,310	0,761	3,454	0,168	0,028	0,714	0,268	0,188	0,013	0,040	0,050	54,558
Prom	45,007	0,395	0,724	0,009	0,007	0,657	0,220	0,126	0,001	0,010	0,010	53,053
σ	0,582	0,199	0,846	0,038	0,009	0,034	0,023	0,034	0,004	0,011	0,014	0,542
Calcopirita												
Min	29,616	0,019	0,003	32,527	0,016	0,413	0,111	0,025	<ILD	0,013	<ILD	34,602
Máx	30,315	0,055	0,307	34,110	0,060	0,506	0,203	0,108	0,016	0,050	0,037	35,819
Prom	29,897	0,035	0,099	33,521	0,027	0,473	0,142	0,077	0,003	0,032	0,015	35,327
σ	0,244	0,010	0,112	0,473	0,014	0,034	0,029	0,029	0,006	0,012	0,014	0,385
Millerita												
Min	0,195	<ILD	59,833	<ILD	<ILD	0,282	0,080	<ILD	<ILD	0,034	0,618	32,532
Máx	2,640	0,073	63,534	<ILD	0,013	0,518	0,236	0,169	0,051	0,177	0,885	36,601
Prom	1,569	0,025	61,263	-	0,001	0,470	0,131	0,086	0,007	0,065	0,736	35,180
σ	0,624	0,025	1,032	-	0,003	0,060	0,040	0,046	0,013	0,035	0,064	1,151
Vaesita												
Min	1,175	<ILD	42,788	<ILD	<ILD	0,606	0,170	0,088	<ILD	0,010	0,477	51,564
Máx	2,981	0,178	45,889	<ILD	0,000	0,729	0,232	0,201	0,021	0,083	0,627	52,937
Prom	1,936	0,119	44,339	-	0,000	0,671	0,198	0,144	0,003	0,047	0,550	52,348
σ	0,664	0,055	0,995	-	0,000	0,040	0,023	0,043	0,008	0,027	0,054	0,520
Polidimita												
Min	2,249	0,045	50,512	<ILD	<ILD	0,460	0,123	0,050	<ILD	<ILD	0,536	36,922
Máx	5,064	0,855	53,360	<ILD	<ILD	0,582	0,183	0,159	0,002	0,077	0,746	42,444
Prom	3,112	0,270	52,241	-	-	0,529	0,154	0,128	0,000	0,038	0,622	41,089
σ	1,136	0,332	1,441	-	-	0,051	0,022	0,044	0,001	0,031	0,080	2,338
Violarita												
Min	10,377	0,041	34,714	<ILD	<ILD	0,486	0,099	0,027	<ILD	<ILD	0,378	37,080
Máx	17,973	0,411	45,269	1,653	<ILD	0,580	0,202	0,157	0,027	0,066	0,627	42,082
Prom	14,078	0,113	40,938	0,138	-	0,531	0,149	0,098	0,004	0,038	0,488	40,130
σ	2,682	0,101	3,067	0,477	-	0,028	0,034	0,037	0,009	0,018	0,081	1,644
Pentlandita												
Min	24,127	0,033	39,811	<ILD	<ILD	0,332	0,086	0,066	<ILD	0,021	0,418	32,743
Máx	25,545	0,082	40,756	<ILD	0,005	0,454	0,164	0,109	0,013	0,061	0,542	33,380
Prom	24,985	0,054	40,309	-	0,001	0,417	0,113	0,086	0,004	0,037	0,461	33,107
σ	0,622	0,022	0,327	-	0,002	0,050	0,029	0,016	0,005	0,015	0,044	0,231

Tabla 1: Tabla con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar de las concentraciones de los distintos elementos analizados mediante microsonda en cada sulfuro. (<ILD = inferior al límite de detección).

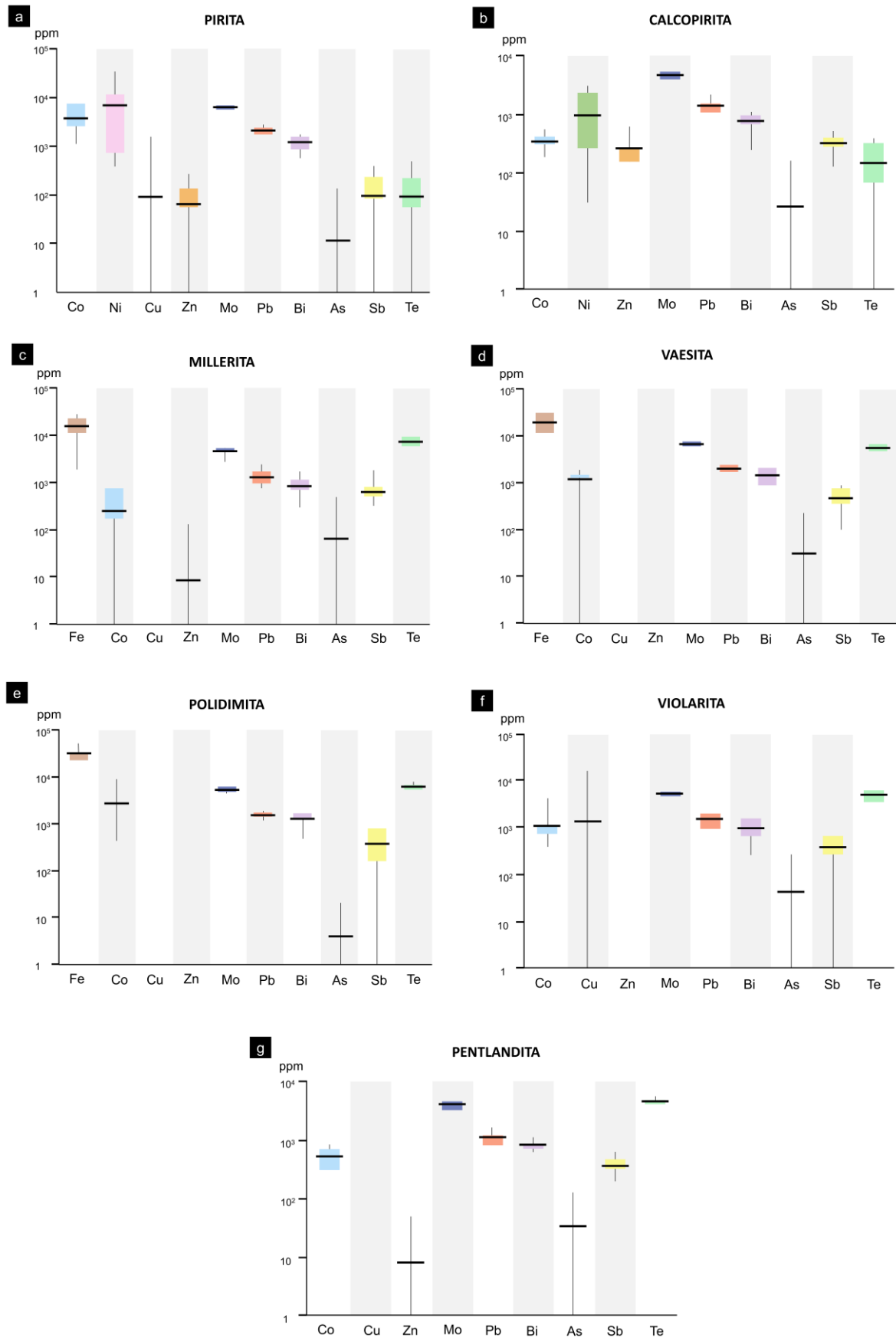


Figura 12: Gráficos que muestran las concentraciones de los elementos traza de cada sulfuro utilizando los datos obtenidos de microsonda. La línea vertical indica el rango de valores, la línea horizontal indica el valor promedio y la franja verde indica el rango en el que se encuentra la mayor parte de los valores.

6. DISCUSIÓN

Las mineralizaciones que constituyen el depósito Enterprise son de origen hidrotermal. La ubicación de estas mineralizaciones indica que los fluidos hidrotermales circularon a través de las fallas principales fallas que cortan la secuencia neoproterozoica (Capistrant, 2013). Al igual que ocurre con la mayoría de los depósitos del Central African Copperbelt, la precipitación de los minerales de mena que constituyen las mineralizaciones del depósito Enterprise, se encuentra controlada principalmente por reacciones de oxidación-reducción (Capistrant, 2013). Las unidades litológicas que constituyen la secuencia metasedimentaria presentan una cantidad importante de materia orgánica, lo que favorecería la reducción de los fluidos mineralizadores (Capistrant, 2013). Las litologías que forman estas unidades son esquistos grafitosos, rocas laminadas ricas en cuarzo de color gris oscuro y metacarbonatos (Capistrant, 2013). Las mineralizaciones suelen presentarse encajadas en estas unidades y en rocas adyacentes a ellas (Capistrant *et al*, 2015).

6.1. Asociaciones minerales

Las mineralizaciones del depósito Enterprise están constituidas por 4 asociaciones minerales (Fig. 13):

- Asociación mineral I

Esta asociación está formada por pentlandita y pirita. La pentlandita aparece como relictos debido a un importante reemplazamiento por pirita (Fig. 9f), y millerita y calcopirita de la Asociación II (Fig. 9f y Fig. 10e). La pirita aparece como agregados masivos cristalinos reemplazados por millerita y calcopirita.

No se aprecian texturas sedimentarias ni diagenéticas, por lo que esta asociación se habría formado, durante la diagénesis tardía o posteriormente, pero previa a la Asociación mineral II. Por tanto, estos minerales se habrían formado entre 883 Ma, edad máxima de la roca encajante (Armstrong *et al.*, 2005) y el momento de formación de millerita y calcopirita.

Las condiciones de presión y temperatura a las que se encontraba el fluido mineralizador debían ser inferiores a los 250°C y los 200 MPa, valores que delimitan la diagénesis del metamorfismo (Rossi, 2010). Según los datos de EPMA de los minerales que conforman

esta asociación, este fluido presentaba altas concentraciones de Fe y Ni, y, en menor cantidad, Co, Mo, Pb, Bi, Sb y Te. Sin embargo, la concentración de Cu en los análisis de microsonda electrónica presenta valores inferiores al límite de detección.

- Asociación mineral II

Esta asociación está formada por millerita y calcopirita. Estos dos minerales siempre aparecen asociados y suelen reemplazar a pirita (Fig. 9a-d y Fig. 10d).

Junto a pirita, conforman la mineralización en venas, que presenta un alto grado de deformación (Fig. 8f), debido al metamorfismo sufrido en la zona. Además, en esta asociación mineral no se observan texturas orgánicas. Esto indica un origen epigenético, posterior a la diagénesis y previo al metamorfismo, ya que las venas están deformadas (Fig. 8f). La mineralización se habría formado entre 883 y 546 Ma (Armstrong *et al.*, 2005; Steven y Armstrong, 2003), edades de la roca encajante y del evento metamórfico. Es posible que este evento tenga relación con la actividad volcánica en la zona, que proporcionaría una fuente de calor adicional. Esto reduciría el rango de edad de la mineralización, ya que esta actividad tuvo lugar entre 765 y 735 Ma (Key *et al.*, 2001).

Los fluidos hidrotermales que habrían originado esta mineralización tendrían que alcanzar una temperatura suficiente para que se produjese el transporte del Ni y el Cu, y precipitase millerita y calcopirita. La millerita se forma entre los 150°C y los 379°C (Yousfi *et al.*, 2010; Kullerud y Yund, 1962), mientras que la calcopirita se forma por encima de los 350°C (Sewards *et al.*, 2014). Por tanto, las temperaturas debieron ser superiores a los 350°C. A partir de la composición de inclusiones fluidas analizadas mediante LA-ICP-MS, en sulfuros mineralizados en venas, Zimba (2012) estimó su temperatura de formación entre los 300 y los 600°C, valores que parecen ser demasiado elevados para la etapa en la que se formaron. Además de Ni, Cu y Fe, estos fluidos presentaban cantidades importantes de otros metales como Co, Mo, Pb, Bi, Sb y Te.

- Asociación mineral III

Esta asociación está formada por cristales euhedrales de magnetita (Fig. 10g). Este mineral no aparece asociado a ningún otro, por lo que el momento de su formación se deduce de su relación con la roca encajante. La magnetita parece presentar algo de deformación (Fig. 8b), aunque mucho menor que la de la roca que alberga la mineralización. Por tanto, esta asociación se habría formado mientras tenía lugar el

metamorfismo de los sedimentos neoproterozoicos, hace aproximadamente 546 Ma (Steven y Armstrong, 2003),

Las condiciones P-T de los fluidos que dieron lugar a esta asociación mineral serían las mismas que se dieron durante la Orogenia Lufiliana. Las rocas del depósito Enterprise muestran unas condiciones máximas de metamorfismo de 500°C y 0,6 GPa (Arana, 2019).

- Asociación mineral IV

Esta asociación está formada por violarita, vaesita, pirita y polidimita (Fig. 9e, g-h y Fig. 10b-c). La violarita reemplaza a pentlandita, millerita y calcopirita. La vaesita se presenta como agregados masivos cristalinos ocupando espacios libres en las rocas. La pirita aparece rellenando oquedades y fracturas en el interior de vaesita. Esta pirita se puede observar en forma de cristales euhedrales en las paredes de fracturas en vaesita. Rellenando el centro de estas fracturas, así como reemplazando parcialmente a pirita y ocupando oquedades en vaesita, se encuentra la polidimita.

Estos minerales se habrían formado tras el metamorfismo, ya que pese a encontrarse encajados en rocas muy deformadas, no presentan deformación (Fig. 8c). Esto permite asignarles una edad máxima de 546 Ma (Steven y Armstrong, 2003), cuando tuvo lugar el evento metamórfico (Fig. 13).

La precipitación de violarita tendría lugar en un rango de temperaturas de entre los 200 y los 300°C (Misra y Fleet, 1974) y la de vaesita, entre los 379°C y los 765°C (Yousfi *et al.*, 2010; Kullerud y Yund, 1962). La pirita se forma en un muy amplio rango de temperaturas. La polidimita es un mineral que se forma a temperaturas inferiores a 356°C (Kullerud y Yund, 1962). Esto indica un posible aumento y posterior descenso de temperatura del fluido hidrotermal en el momento en el que tuvo lugar la precipitación de vaesita. La presión en esta etapa post-deformación no debió ser muy elevada, ya que es común que los minerales de estas asociaciones se encuentren rellenando espacios de gran tamaño. Los fluidos que originaron esta asociación mineral, además de gran cantidad de Ni y Fe, presentaban cantidades menores de Mo, Pb, Bi, Sb y Te. Este fluido era muy empobrecido en Cu ya que, en la mayoría de los análisis realizados con microsonda electrónica, los valores de concentración de Cu se encuentran por debajo del límite de detección.

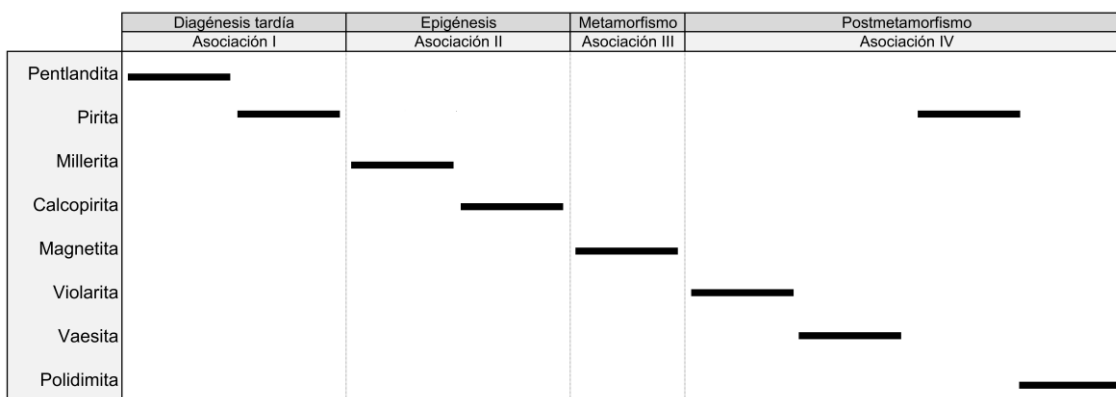


Figura 13: Secuencia paragenética del depósito.

6.2. Fuentes de Ni y Cu

El origen del Ni en el depósito Enterprise es objeto de debate, así como la razón de la baja cantidad de Cu y Co en relación a la mayoría de los depósitos de la Copperbelt.

Varios autores atribuyeron el origen de los metales a rocas máficas situadas en profundidad (Annels, 1974, 1979, 1989; Annels y Simmonds, 1984; Lefebvre, 1989). Sin embargo, esta teoría ha sido descartada ya que, tras realizar estudios aeromagnéticos y gravimétricos, no se ha identificado en la Copperbelt ningún cuerpo intrusivo lo suficientemente grande como para poder suministrar tal cantidad de metales (Sweeney *et al.*, 1991a,b; Sebagenzi, 1993, 1997a, b; Gecamines, no publicado).

Unrug (1988, 1989) defiende que los metales presentes en los fluidos mineralizadores se vinculan a la llegada de magmas máficos que forman las rocas ígneas del Grupo Nguba y a la lixiviación de los sedimentos de esta unidad debido a la circulación convectiva de sedimentos de cuenca. Esta hipótesis también ha sido descartada por distintos autores (Sweeney y Binda, 1989a,b), ya que estas rocas no presentarían la concentración suficiente de metales.

Caliteux *et al.* (2004), proponen un modelo genético en el que la fuente de los metales es el basamento preneoproterozoico del cinturón de Katanga, ya estas rocas presentan cantidades importantes de Cu y Co, y cantidades menores de Ni, Au, Ag y PGE. Pese a estar presentes estos metales en cantidades menores, existe un enorme volumen de rocas que bien pudieran haber proporcionado la cantidad requerida de metales.

En las muestras estudiadas en este trabajo, se observan relictos de pentlandita. La pentlandita es un mineral típicamente magmático (Fleet *et al.*, 1993). Al no contar con

los análisis químicos adecuados y no poder observar sus aspectos texturales debido a que se encuentra muy reemplazada por otros minerales, no es posible determinar si presenta un origen magmático o hidrotermal. En el caso de tratarse de una removilización hidrotermal de una mineralización primaria magmática, se resolverían bastantes dudas acerca del origen del Ni. Para determinarlo sería necesario realizar un análisis mineralógico más detallado de la pentlandita y de la paragénesis mineral en su conjunto.

6.3. Comparación con antecedentes bibliográficos

Capistrant (2013) establece para el depósito Enterprise dos etapas de mineralización de Ni, una primera de Ni-Fe en la que se formó vaesita, millerita y pirita, y una segunda de Fe-Ni-Mo, en la que se formó bravoíta, millerita y molibdenita. Además, se produjo formación de calcopirita, que continuó tras la finalización de estas dos etapas. En este trabajo se han estudiado cuatro de estos minerales, pirita, millerita, calcopirita y vaesita, y su estudio textural no apoya la secuencia paragenética establecida por esta autora.

Caliteux *et al.* (2004) estudian los depósitos de la Copperbelt y han establecido una etapa temprana de mineralización, en la que se forman pirita, pirita de Ni-Co, calcopirita y bornita, y una etapa posterior en la que se forman sulfuros de Cu-Co. Entre ambas etapas se forman sulfuros del grupo de la pirita, pirita, cattierita y vaesita. Además, estos autores documentan la presencia de polidimita en un depósito estudiado, y establecen que su formación se produjo posterior a la de pirita y vaesita.

Según Capistrant (2013), las mineralizaciones se produjeron por una primera etapa diagenética, en la que se forma pirita, y una segunda etapa post-deformación en la que se formaron el resto de los minerales descritos en su trabajo. Es decir, data la millerita y la calcopirita como postdeformación, cuando en este trabajo se han observado en el interior de venas muy afectadas por el metamorfismo.

Caliteux *et al.* (2004) hablan de la atribución, para los depósitos de la Copperbelt, de dos etapas de mineralización de sulfuros (Hoy y Ohmoto, 1989), una primera de singenética a diagenética temprana, y una segunda asociada a fluidos sobresaturados de Cu formado durante los procesos metamórficos (Cailteux y Kampunzu, 1995; Kampunzu and Cailteux, 1999). Sin embargo, no se menciona ninguna etapa de mineralización postdeformación.

7. CONCLUSIONES

El depósito Enterpise está constituido por mineralizaciones de Ni y Cu de origen hidrotermal. Se ha establecido para el depósito las siguientes asociaciones minerales: (i) pentlandita y pirita, (ii) millerita y calcopirita, (iii) magnetita, (iv) violarita, vaesita, pirita y polidimita. La formación de estos minerales se produjo a lo largo de distintas etapas geológicas.

La pentlandita y pirita se formaron durante la diagénesis tardía de los sedimentos del Subgrupo Roan Inferior (883-750 Ma), a partir de un fluido con unas condiciones P-T inferiores a los 200 MPa y los 250°C. La millerita y la calcopirita tienen origen epigenético, formadas entre la litificación del sedimento y el metamorfismo (883-546 Ma), a una temperatura de entre 150°C y 379°C. Durante la etapa en la que se produjo el metamorfismo (~546 Ma), tuvo lugar la formación de magnetita, en unas condiciones de P-T inferiores a 0,6 GPa y 500°C.

Durante la etapa postdeformación se formaron el resto de los minerales de la secuencia paragenética. La violarita a unas temperaturas de entre 200 y 300°C, la vaesita de entre 379°C y 765°C y la polidimita, inferiores a 356°C. La presión en esta etapa no es elevada.

La precipitación de estos minerales se encuentra controlada, principalmente, por reacciones de oxidación-reducción.

8. BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, P., (1995). Evidence for a Neoproterozoic carbonate ramp on the northern edge of the Central African craton— Relations with Late Proterozoic intracratonic troughs. *Geologische Rundschau*, vol. 84, no. 3: 636–648.

Annels, A.E., (1974). Some aspects of the stratiform ore deposits of the Zambian Copperbelt and their genetic significance. En: Bartholomé, P. (Ed.), *Gisements stratiformes et provinces cuprifères*. Centenaire Société Géologique de Belgique, Liège: 235–254.

Annels, A.E., (1979). The genetic relevance of recent studies at Mufulira Mine, Zambia. *Annales Société Géologique de Belgique* 102: 431– 449.

Annels, A.E., (1989). Ore genesis in the Zambian Copperbelt with particular reference to the northern sector of the Chambishi basin. En: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper, vol. 36: 427–452.

Annels, A.E., Simmonds, J.R., (1984). Cobalt in the Zambian Copperbelt. *Precambrian Research* 25: 75–98.

Appleton, J.D., (1978). The geology of the Kabampo Gorge area. *Zambian Geological Survey*, 40.

Arana Silva, L., (2019). Estudio mineralógico y petrográfico de rocas metamórficas del zócalo del yacimiento Enterprise (Zambia) (TFG). Tutores: Sáez R. y Donaire, T. Universidad de Huelva.

Armstrong, R.A., Master, S., Robb, L.J., (2005). Geochronology of the Nchanga granite, and constraints on the maximum age of the Katanga supergroup, Zambian Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences*, 42: 32-40.

Armstrong, R.A., Robb, L.J., Master, S., Kruger, F.J., Mumba, P.A.C.C., (1999). New U–Pb age constraints on the Katangan sequence, central African Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences* 28: 6–7.

Batumike, M.J., Cailteux, J.L.H., Kampunzu, A.B., (2007). Lithostratigraphy, basin development, base metal deposits, and regional correlations of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu rock successions, central African Copperbelt. *Gondwana Res.*, 11: 432-447.

Batumike, M.J., Kampunzu, A.B., Cailteux, J.H., (2006). Petrology and geochemistry of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu Groups, Katangan Supergroup, southeast Congo—Implications for provenance, paleoweathering and geotectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 44, no. 1: 97–115.

Cahen, L., (1954). *Géologie du Congo Belge [Geology of the Belgian Congo]*. Liège, Belgium, Vaillant-Caramanne, 577 pp.

Cahen, L., Snelling, N.J., Delhal, J., Vail, J.R., Bonhomme, M., Ledent, D., (1984). *Geochronology and evolution of Africa*.: Oxford, Clarendon Press, 512 pp.

Cailteux, J.L.H., Kampunzu, A.B., (1995). The Katangan tectonic breccias in the Shaba Province (Zaire) and their genetic significance. En: Wendorff, M., y Tack, L. (eds.), Late Proterozoic belts in central and southwestern Africa. IGCP Project, 302 : Musée royal de l'Afrique centrale, 8, *Annales des Sciences Géologiques*, 101: 63–76.

Caliteux, J.L.H., Kampunzu, A.B., Lerouge, C., Kaputo, A.K., Milesi, J.P., (2004). Genesis of sediment-hosted stratiform copper–cobalt deposits, central African Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences*, 42 (2005): 134–158. Elsevier Science Publishers. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2005.08.001.

Calver, C.R., Crowley, J.L., Wingate, M.T.D., Evans, D.A.D., Raub, T.D., Schmitz, M.D., (2013). Globally synchronous marinoan deglaciation indicated by U-Pb geochronology of the cotton's breccia, Tasmania, Australia. *Geology*, 31.

Capistrant, P. L. (2013). Geology of the Enterprise hydrothermal nickel deposit, eastern Kabompo dome, North-Western Province, Zambia. Tesis doctoral, Golden, Colorado, Colorado School of Mines, 186 pp.

Capistrant, P.L., Hitzman, M.W., Wood, D., Kelly, N.M., Munshya Zimba, G.W., Kuiper, Y., Jack, D., Stein, H., (2015). Geology of the Enterprise Hydrothermal Nickel Deposit, North-Western Province, Zambia. *Economic Geology*, 110: 9–38.

Condon, D., Zhu, M., Bowring, S.A., Wang, W., Yang, A., Jin, Y., (2005). U-Pb ages from the neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308: 95-98.

Fanning, C.M., Link, P.K., (2004). U-Pb SHRIMP ages of neoproterozoic (Sturtian) glaciogenic Pocatello Formation, southeastern Idaho. *Geology*, 32 : 881-884.

Fleet M. E., Chryssoulis S. L., Stone W. E., Weisener C. G., (1993). Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe–Ni–Cu–S system: experiments on the fractional crystallization of sulfide melt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115: 36–44.

François, A., (1995). Problèmes relatifs au Katanguien du Shaba. En : Wendorff, M., Tack, L. (eds.), Late Proterozoic Belts in Central Africa. Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. *Annales des Sciences Géologiques*, 101 : 1–20.

Freeman, P.V., (1988). Description of some mineral deposits discovered or re-investigated in the post-World War II period. Unpublished report, Lusaka.

Gray, D., Lawlor, M., Briggs, A., (2020). Trident Project Technical Report. First Quantum Minerals LTD.

Halley, S.W., Wood, D., Stoltze, A., Godfroid, J., Goswell, H., Jack, D., (2016). Using Multielement Geochemistry to Map Multiple Components of a Mineral System: Case Study from a Sediment-Hosted Cu-Ni Camp, NW Province, Zambia. *Society of Economic Geologists*, Newsletter, 104: 14-21.

Hitzman, M.W., Broughton, D., Selley, D., Woodhead, J., Wood, D., Bull, S., (2012) The Central African Copperbelt: Diverse Stratigraphic, Structural, and Temporal Settings in the World's Largest Sedimentary Copper District. En: *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A tribute to Richard H. Sillitoe*, Jeffrey W. Hedenquist, Michael Harris, Francisco Camus. DOI: 10.5382/SP.16.19

Hoffmann, K.H., Condon, D.J., Bowring, S.A., Crowley, J.L., (2004). U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: constraints on Marinoan glaciation. *Geology*, 32: 817-820.

Hoy, L.D., Ohmoto, H., (1989). Constraints for the genesis of redbed-associated stratiform Cu deposits from sulphur and carbon mass-balance relations. En: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), Sediment-hosted stratiform copper deposits. Geological Association of Canada, Special Paper, vol. 36, pp. 135–149.

John, T., Schenk, V., Mezger, K., Tembo, F., (2004). Timing and PT evolution of whiteschist metamorphism in the Lufilian arc-Zambezi Belt Orogen (Zambia): Implications for the assembly of Gondwana. *Journal of Geology*, 122: 71–90.

Kadima, E., Delvaux, D., Sebagenzi, S.N., Tack, L., Kabeya, S.M., (2011). Structure and geologic history of the Congo Basin—An integrated interpretation of gravity, magnetic and reflection seismic data. *Basin Research*, 23: 499–527.

Kampunzu, A.B., Cailteux, J., (1999). Tectonic evolution of the Lufilian Arc (central Africa copper belt) during neoproterozoic Pan African orogenesis. *Gondwana Res.*, 2: 401-421.

Kampunzu, A.B., Kanika, M., Kapenda, D., Tshimanga, K., (1993). Geochemistry and geotectonic setting of late Proterozoic Katangan basic rocks from Kibambale in central Shaba (Zaire). *Geologische Rundschau*, 82: 619–630.

Key, R.M., Liyungu, A.K., Njamu, F.M., Somwe, V., Banda, J., Mosley, P.N., Armstrong, R.A., (2001). The Western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization. *Journal of African Earth Sciences*, 33: 503-528.

Klinck, B.A., (1977). The geology of the Kabompo dome area: Explanation of degree sheet 1227, NE quarter. *Geological Survey of Zambia*, 44.

Kullerud, G., Yund, R.A. (1962). The Ni—S System and Related Minerals. *Journal of Petrology*, 3: 126-175.

Lefebvre, J.J., (1989). Depositional environment of copper–cobalt mineralization in the Katangan sediments of Southeast Shaba, Zaire. En: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), Sediment-hosted stratiform copper deposits. Geological Association of Canada, Special Paper, vol. 36: 401–426.

Lepersonne, J., (1974). Carte géologique du Zaïre [Geologic map of Zaire], 1:2,000,000. République du Zaïre, Département des Mines, Service Géologique.

Lepersonne, J., (1977). Structure géologique du bassin inférieur du Zaïre [Geological structure of the inner basin of Zaire]. Académie Royale de Belgique, *Bulletin de la Classe des Sciences*, serie 5, vol. 63, no. 12: 941–965.

Master, S., (2020). The Stratabound, Sediment-Hosted Cu-Co Deposits of the Central African Copperbelt. En: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. DOI: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00200-9

Misra, K., Fleet, M.E., (1974). Chemical Composition and Stability of Violarite. *Economic geology*, 69: 91-405

Porada, H., Berhorst, V., (2000). Towards a new understanding of the Neoproterozoic-early Palaeozoic Lufilian and northern Zambezi belts in Zambia and the Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences*, 30: 727–771.

Rossi, C., (2010). Introducción a la diagénesis de las rocas carbonáticas. En: Arche, A. (ed.), *Sedimentología, del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. CSIC.

Sebagenzi, M.N., (1993). Etude gravimétrique et géothermique du Sud-Est du Zaïre et du Nord de la Zambie (Afrique centrale). Thèse de Doctorat en sciences, University of Paris 7, 272pp.

Sebagenzi, M.N., (1997a). Gravity modelling of the lithosphere in South-eastern Zaïre and Zambia (central Africa). *African Geosciences Reviews*, 4 : 153–175.

Sebagenzi, M.N., (1997b). Signification tectonique du couple d'anomalies gravimétriques négative-positives de la chaîne katanguenne (Néoprotérozoïque) du Sud-Est du Zaïre et du Nord de la Zambie (Afrique centrale): interprétation préliminaire. *Annales de la Société Géologique de Belgique* 120 : 161–174.

Seward, T.M., Williams-Jones, A., Migdisov, A. (2014). The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids. *Treatise Geochem*, 13: 29–57.

Steven, N., and Armstrong, R., (2003). A metamorphosed Proterozoic carbonaceous shale-hosted Co-Ni-Cu deposit at Kalumbila, Kabompo dome: the Copperbelt Ore Shale in northwestern Zambia. *Economic Geology*, 98: 893–909.

Sweeney, M.A., Binda, P.L., (1989a). Mineralization controls and source of metals in the Lufilian Fold Belt, Shaba (Zaire), Zambia, and Angola— a discussion. *Economic Geology*, 84: 963–964.

Sweeney, M.A., Binda, P.L., (1989b). The role of diagenesis in the formation of the Konkola Cu–Co ore-body of the Zambian Copperbelt. En: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper, vol. 36: 499– 518.

Sweeney, M.A., Binda, P.L., Vaughan, D.J., (1991). Genesis of the ores of Zambian Copperbelt. *Ore Geology Reviews*, 6: 51-76. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Sweeney, M.A., Vaughan, D.J., Binda, P.L., (1991b). The geochemistry of the basement complex of the Zambian Copperbelt. Implications for mineralization. En: Pagel, M., Leroy, J.L. (Eds.), *Source, Transport and Deposition of Metals*. 25th Anniversary Meeting of Société de Géologie Appliquée, Nancy, France. Balkema: 359–362.

Tack, L., Delpomdor, F., Kanda Nkula, V., Prétat, A., Dewaele, S., Baudet, D., Fernandez-Alonso, M., Boven, A., (2010). The Neoproterozoic West Congo and Katanga Supergroups— Similarities and differences. En: "Quête des Ressources" en Afrique Central Book of abstracts, vol. 2: 69–75.

Tembo, F., Kampunzu, A.B., Porada, H., (1999). Tholeiitic magmatism associated with continental the Lufilian Fold belt of Zambia. *Journal of African Earth Sciences*, 28: 403-425.

Torremans, K., Muchez, P., Sintubin, M., (2018). Non-cylindrical parasitic folding and strain partitioning during the Pan-African Lufilian orogeny in the Chambishi-Nkana Basin, Central African Copperbelt. *Solid Earth Discussions*: 1-41.

Unrug, R., (1988). Mineralization control and source of metals in the Lufilian Fold Belt, Shaba (Zaire), Zambia, and Angola. *Economic geology* 83: 1247–1258.

Unrug, R., (1989). Mineralization control and source of metals in the Lufilian Fold Belt, Shaba (Zaie), Zambia, and Angola—a reply. *Economic Geology* 84: 963–970.

Wendorff, M., Key, R.M., (2009). The relevance of the sedimentary history of the Grand Conglomerat Formation (Central Africa) to the interpretation of the climate during a major Cryogenian glacial event. *Precambrian Research*, 172: 127-142.

Williams, P.R., Nisbet, B.W., (2017). Structural framework of the Lufilian Fold Belt in the Domes region of North Western Province, Zambia from interpretation of geophysical data. *Journal of African Earth Sciences*, 129: 542-557.

Yousfi, O. , Donnadiou, P., Bréche, Y., Robaut, F., Charlot, F. , Kasper, A. , Serruys, F., (2010). Phase transformations in nickel sulphide: Microstructures and mechanisms. *Acta Materialia*, 58: 3367–3380.

Zimba, M., (2012). The composition and role of brines in formation of Copper Belt ores: Enterprise nickel prospect case study, North-Western Province, Zambia: M.Sc. thesis, University of Leeds, 58 pp.

Recursos electrónicos

ETAS, 2010. INCA

9. ANEXOS

	PIRITAS																			
	Reemplazadas por Mi					Reemplazando a Pnt					Masiva			En Vae						
Fe	44,947	45,085	44,543	44,965	45,239	45,969	45,092	43,731	44,93	44,888	46,31	45,43	45,337	45,28	45,53	44,835	44,382	44,372	44,368	44,901
Co	0,716	0,344	0,28	0,68	0,392	0,201	0,313	0,137	0,761	0,436	0,346	0,356	0,608	0,543	0,543	0,522	0,282	0,125	0,203	0,121
Ni	0,68	0,328	0,229	0,086	0,078	0,041	1,623	3,454	0,193	1,164	0,552	0,043	0,079	0,051	0,082	0,666	1,199	1,604	1,201	1,118
Cu	0	0,001	0	0	0,018	0	0	0	0,168	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	0,012	0	0,028	0	0	0,002	0,011	0	0,023	0,02	0	0,004	0	0	0,013	0,014	0	0,006	0	0
Mo	0,649	0,675	0,663	0,657	0,647	0,601	0,704	0,699	0,624	0,66	0,613	0,609	0,628	0,714	0,694	0,672	0,626	0,634	0,687	0,681
Pb	0,214	0,187	0,219	0,205	0,242	0,237	0,214	0,268	0,226	0,19	0,185	0,219	0,237	0,192	0,243	0,218	0,203	0,246	0,202	0,243
Bi	0,096	0,126	0,133	0,144	0,131	0,085	0,156	0,188	0,13	0,102	0,163	0,099	0,138	0,18	0,075	0,124	0,062	0,105	0,158	0,13
As	0	0	0	0	0,011	0	0	0	0	0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0,01	0,025	0,017	0	0	0,017	0,018	0	0,013	0	0,008	0,009	0,024	0	0	0,016	0,04	0	0,002	
Te	0	0	0	0,006	0	0	0,015	0,05	0,016	0,014	0	0	0,005	0,015	0	0	0,038	0,011	0,023	
S	52,631	52,707	54,558	53,342	53,501	52,874	52,188	52,262	52,696	52,858	52,706	53,713	53,196	53,402	52,895	53,49	53,112	53,057	53,266	52,612
Total	99,955	99,478	100,67	100,085	100,259	100,01	100,333	100,807	99,767	100,345	100,888	100,481	100,232	100,391	100,09	100,541	99,882	100,227	100,096	99,831

	CALCOPIRITAS								
	En Py	Reemplazada por Vio			Interc.	Reemp a Pnt	En Vae		
Fe	30,315	29,776	29,702	29,968	29,616	29,65	29,866	29,971	30,212
Co	0,055	0,04	0,038	0,019	0,031	0,034	0,028	0,038	0,032
Ni	0,04	0,003	0,034	0,054	0,009	0,23	0,307	0,027	0,187
Cu	32,527	33,894	33,299	33,676	33,699	33,657	33,119	33,705	34,11
Zn	0,037	0,018	0,024	0,016	0,019	0,022	0,02	0,06	0,024
Mo	0,434	0,506	0,489	0,444	0,489	0,501	0,413	0,478	0,505
Pb	0,203	0,168	0,129	0,117	0,121	0,145	0,135	0,146	0,111
Bi	0,035	0,094	0,108	0,084	0,025	0,075	0,088	0,079	0,107
As	0	0	0	0	0	0	0,008	0,016	0
Sb	0,036	0,03	0,045	0,021	0,013	0,039	0,029	0,025	0,05
Te	0,015	0,037	0,013	0,007	0,026	0	0,032	0	0,003
S	34,602	35,819	35,722	35,194	35,143	35,702	35,413	35,262	35,085
Total	98,299	100,385	99,603	99,6	99,191	100,055	99,458	99,807	100,426

	MILLERITAS														
	Reemplazando a Py			Interc.	Reemplazada por Vio			Reemplazando a Pnt			En Vae				
Fe	1,911	1,253	1,602	2,184	2,64	1,581	1,508	1,248	0,544	1,903	1,533	2,284	1,441	1,711	0,195
Co	0	0,036	0,07	0,073	0,02	0,056	0,022	0,01	0	0,047	0	0,022	0,018	0,008	0
Ni	60,39	60,605	60,615	62,276	61,917	60,81	60,05	60,835	62,001	60,531	61,881	59,833	61,257	62,415	63,534
Cu	0	0	0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0,282	0,399	0,465	0,511	0,472	0,514	0,474	0,477	0,518	0,496	0,493	0,478	0,468	0,512	0,489
Pb	0,236	0,119	0,125	0,169	0,11	0,119	0,135	0,144	0,098	0,163	0,106	0,093	0,163	0,102	0,08
Bi	0	0,032	0,147	0,086	0,169	0,049	0,099	0,103	0,076	0,076	0,031	0,112	0,097	0,072	0,136
As	0,051	0	0	0,011	0,016	0,004	0,008	0	0	0	0	0	0	0,009	
Sb	0,177	0,07	0,076	0,08	0,058	0,052	0,034	0,04	0,065	0,066	0,073	0,038	0,074	0,04	0,038
Te	0,814	0,732	0,755	0,687	0,618	0,749	0,748	0,717	0,768	0,76	0,671	0,752	0,885	0,669	0,713
S	32,532	33,648	36,088	34,952	34,516	35,892	34,163	36,601	36,008	35,407	34,252	36,321	36,224	35,405	35,687
Total	96,393	96,894	99,943	101,042	100,536	99,826	97,241	100,175	100,078	99,449	99,04	99,933	100,627	100,934	100,881

	VAESITAS						
	Masiva					En Py	
Fe	1,958	2,548	2,981	1,175	1,956	1,746	1,187
Co	0,131	0,13	0,178	0,136	0,127	0,128	0
Ni	43,762	43,826	42,768	45,889	44,445	44,98	44,685
Cu	0	0	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0,729	0,668	0,702	0,678	0,669	0,643	0,606
Pb	0,232	0,207	0,214	0,179	0,17	0,178	0,203
Bi	0,194	0,088	0,107	0,161	0,129	0,201	0,129
As	0	0	0	0,021	0	0	0
Sb	0,036	0,016	0,01	0,055	0,072	0,056	0,083
Te	0,511	0,599	0,584	0,525	0,529	0,477	0,627
S	52,464	52,73	52,937	51,564	52,647	51,705	52,389
Total	100,017	100,812	100,501	100,362	100,765	100,114	99,909

	POLIDIMITAS				
	En Vae		En Mi		
Fe	2,249	2,475	2,668	3,103	5,064
Co	0,097	0,195	0,045	0,16	0,855
Ni	53,36	53,339	50,512	53,168	50,828
Cu	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0	0
Mo	0,507	0,582	0,46	0,576	0,521
Pb	0,165	0,123	0,183	0,145	0,154
Bi	0,05	0,137	0,152	0,14	0,159
As	0	0,002	0	0	0
Sb	0,045	0,054	0,077	0,016	0
Te	0,746	0,618	0,637	0,573	0,536
S	42,153	41,99	36,922	42,444	41,937
Total	99,372	99,515	91,656	100,325	100,054

	PENTLANDITAS					
	Reemplazada por Py	Reemp por Mi	Reemplazada por Vio			
Fe	24,399	24,127	24,848	25,471	25,545	25,518
Co	0,068	0,034	0,033	0,035	0,07	0,082
Ni	40,273	40,756	40,481	40,105	40,426	39,811
Cu	0	0	0	0	0	0
Zn	0,005	0	0	0	0	0
Mo	0,454	0,332	0,452	0,454	0,425	0,383
Pb	0,086	0,097	0,082	0,121	0,115	0,164
Bi	0,083	0,109	0,079	0,101	0,066	0,078
As	0	0,002	0	0,013	0,006	0
Sb	0,033	0,039	0,047	0,023	0,061	0,021
Te	0,458	0,475	0,418	0,444	0,431	0,542
S	32,743	33,293	33,179	32,972	33,076	33,38
Total	98,602	99,264	99,629	99,739	100,221	99,979

	VIOLARITAS											
	Reemplazando a Mi					Reemplazando a Pnt						
Fe	14,591	11,502	11,84	15,098	16,351	12,18	17,358	17,973	17,128	13,257	11,286	10,377
Co	0,077	0,057	0,082	0,056	0,066	0,079	0,094	0,193	0,411	0,092	0,041	0,106
Ni	40,594	43,821	43,342	39,31	34,714	42,513	38,053	38,799	38,815	42,431	43,59	45,269
Cu	0	0	0	0	0	0	1,653	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0,511	0,509	0,536	0,534	0,548	0,486	0,58	0,537	0,55	0,519	0,57	0,497
Pb	0,181	0,17	0,153	0,202	0,156	0,112	0,191	0,112	0,166	0,115	0,135	0,099
Bi	0,097	0,123	0,12	0,102	0,07	0,027	0,117	0,14	0,157	0,093	0,049	0,078
As	0	0,015	0	0	0,027	0,008	0	0	0	0	0	0
Sb	0,039	0,041	0,038	0,028	0,031	0,045	0,06	0,033	0	0,053	0,066	0,016
Te	0,47	0,522	0,533	0,49	0,431	0,559	0,378	0,388	0,416	0,444	0,627	0,598
S	37,388	40,362	40,141	40,556	37,08	40,122	41,617	41,435	42,082	38,45	41,085	41,239
Total	93,948	97,122	96,785	96,376	89,474	96,131	100,101	99,61	99,725	95,454	97,449	98,279

Resultados de los análisis mediante microsonda en %.