

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**“ZONAMIENTO EN PÓRFIDO DE COBRE POR SOLUBILIZACIÓN DE
MINERALES ECONÓMICOS PARA MEJORAR EL GRADO DE
RECUPERACIÓN”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR
ELIAS DENIS FLORES SOSA**

ASESOR

M.Sc. Lic. ATILIO MENDOZA APOLAYA

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria:

Este trabajo es dedicado a mis padres Abelardo y Elin, por su apoyo incondicional a lo largo de cada etapa de mi vida, por los consejos, educación y buenos valores que me brindaron para poder ser mejor persona en la vida, por ser mi mayor admiración y ejemplo de superación todos los días.

Agradecimientos:

A mis profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería por las enseñanzas y motivación que me brindaron durante mi etapa universitaria. A mi asesor M. Sc. Atilio Mendoza Apolaya, especialista Dr. Ing. Luis H. Chirif Rivera y metodólogo Dr. Walter Barrutia Feijóo, por las observaciones, recomendaciones y pautas realizadas durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

RESUMEN

El reconocimiento del zonamiento hidrotermal en yacimientos tipo pórfido de cobre permite identificar ensambles de minerales característicos de alteración y mineralización, cuya descripción y caracterización mineralógica detallada permiten elaborar modelos geológicos más eficaces utilizados para los procesos metalúrgicos.

Se realizó la presente investigación con el propósito de formular parámetros de clasificación de la mineralización agrupados por minerales de cobre con características y comportamientos similares en base al estudio de sus solubilidades, y con ello, mejorar el proceso metalúrgico de recuperación.

Se ha recopilado información bibliográfica sobre yacimientos porfiríticos de cobre y se ha obtenido muestras de campo de las unidades de análisis. Con esta información se ha realizado una síntesis para detallar las características de un yacimiento tipo pórfido de cobre enfocado principalmente en los procesos hidrotermales que dieron origen a la alteración y mineralización. Posterior a ello, se realizaron pruebas de solubilidades de las muestras por ácido sulfúrico y cianuro de sodio, donde finalmente se establecen los parámetros de clasificación para las distintas zonas de mineralización y el zonamiento respectivo, de este modo utilizar dicha información para obtener las mejores recuperaciones de cobre en el proceso con valores por encima del 93%.

ABSTRACT

The recognition of hydrothermal zoning in porphyry copper deposits allows the identification of characteristic mineral assemblages of alteration and mineralization, whose detailed description and mineralogical characterization allow the elaboration of efficient geological models used for metallurgical processes.

The present research was carried out with the purpose of formulating mineralization classification parameters grouped by copper minerals with similar characteristics and behaviors based on the study of their solubilities, with this, improving the metallurgical recovery process.

Bibliographic information on porphyritic copper deposits has been compiled and field samples have been obtained from the analysis units. Based on this information, a synthesis has been made to detail the characteristics of a porphyry copper deposit focused mainly on the hydrothermal processes that gave rise to the alteration and mineralization. Subsequently, solubility tests were carried out on the samples by sulfuric acid and sodium cyanide, where finally the classification parameters for the different mineralization zones and the respective zoning were established, in this way, use this information to obtain the best copper recoveries in the metallurgical process with values above 93%.

PRÓLOGO

El presente trabajo investigativo sostiene como aporte la formulación de un zonamiento de mineralización basado en el análisis secuencial del cobre por solubilidades en ácido sulfúrico y cianuro de sodio.

El contenido del trabajo se encuentra constituido por seis capítulos, los cuales están conformados de la siguiente manera:

El en capítulo I se describen las generalidades, la descripción del problema de la investigación indicando las causas y consecuencias del problema, el objetivo que se busca lograr con la investigación y los antecedentes investigativos internacionales y nacionales.

En el capítulo II se establece el marco teórico, donde se desarrollan resúmenes de investigaciones importantes agrupadas por temas relacionados con los procesos hidrotermales de los yacimientos porfiríticos y los fundamentos de la solubilidad, también se desarrolla el marco conceptual indicando el significado empleado en la investigación de algunos términos sujetos a varias interpretaciones.

En el capítulo III se define la hipótesis del presente trabajo de investigación con sus respectivas variables de estudio y la operacionalización de estas.

En el capítulo IV se detalla la metodología de la investigación empleada a través de; (1) el tipo y diseño de la investigación mediante el enfoque, alcance y diseño de la investigación, (2) unidad de análisis empleado y (3) la matriz de consistencia.

En el capítulo V se desarrolla el trabajo de investigación a partir de la recolección de información bibliográfica y recolección de los datos de campo, continuando con el procesamiento de la información recolectada y finalmente los análisis realizados.

En el capítulo VI se lleva a cabo el análisis en base a los resultados obtenidos en la investigación y se realiza la discusión de estos.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones determinadas a partir de todo el proceso investigativo del trabajo de suficiencia profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
PRÓLOGO	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación	3
1.3 Objetivo.....	6
1.4 Antecedentes investigativos	6
1.4.1 Ámbito internacional.....	6
1.4.2 Ámbito nacional.....	11
CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	16
2.1 Marco Teórico.....	16
2.1.1 Zonamiento y alteraciones hidrotermales	16
2.1.2 Mineralización hipógena de yacimientos porfiríticos	19
2.1.3 Mineralización supérgena de yacimientos porfiríticos.....	25
2.1.4 Solubilidad	29
2.1.5 Factores que afectan la solubilidad	31
2.2 Marco Conceptual.....	33
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	34
3.1 Hipótesis	34
3.2 Operacionalización de variables	34
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
4.1 Tipos y Diseño de Investigación.....	36
4.1.1 Enfoque	36
4.1.2 Alcance	36
4.1.3 Diseño de la investigación	37
4.2 Unidad de análisis	37

4.3	Matriz de consistencia.....	40
CAPÍTULO V: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		42
5.1	Recolección de Datos.....	42
5.2	Procesamiento de la Información.....	42
5.2.1	Geología regional.....	44
5.2.1.1	Estratigrafía.....	46
-	Precámbrico – Paleozoico.....	46
-	Mesozoico.....	48
-	Cenozoico.....	51
5.2.1.2	Rocas intrusivas.....	56
-	Superunidades Intrusivas.....	58
-	Superunidad Punta Coles.....	60
-	Batolito de la Costa.....	61
5.2.1.3	Tectónica en el sur del Perú.....	65
5.2.1.4	Cinemática de subducción.....	67
5.2.1.5	Evolución Tectónica.....	69
5.2.2	Geología local de pórfidos de cobre del Sur del Perú.....	73
5.2.2.1	Petrografía.....	75
5.2.2.2	Alteraciones hidrotermales.....	77
5.2.2.3	Mineralización.....	86
5.2.3	Análisis de la información.....	92
5.2.4	Análisis de Cobre Secuencial.....	93
5.2.5	Solubilidad de minerales de cobre con cianuro.....	95
5.2.6	Solubilidad de minerales de cobre con ácido sulfúrico.....	96
5.2.7	Método de análisis.....	97
5.2.8	Índice de solubilidad.....	97
5.2.9	Cálculo experimental para determinación de solubilidades.....	98
5.2.9.1	Cobre soluble.....	98
5.2.9.2	Solubilidad de minerales de cobre.....	104
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		112
6.1	Desarrollo de los procesos hidrotermales relacionados a un yacimiento tipo pórfido de cobre.....	112
6.2	Relación de los parámetros de clasificación establecidos para la mineralización con el análisis de cobre secuencial.....	113

6.3	Zonamiento de la mineralización en base a la interpretación geológica de secciones 115	
6.4	Implicancia del zonamiento de mineralización en la recuperación del cobre.....	118
	CONCLUSIONES	120
	RECOMENDACIONES.....	123
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	ANEXOS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1,1 Perfil de mineralización para un depósito Pórfido de Cobre.
- Figura 2,1 Minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales.
- Figura 2,2 Rangos de temperatura para la formación de las alteraciones hidrotermales.
- Figura 2,3 Perfil supérgeno maduro basado en depósitos de pórfido de cobre en el norte de Chile.
- Figura 2,4 Productos de solubilidades de algunas sales a 25°C.
- Figura 4,1 Ubicación Geográfica de los proyectos mineros Cuajone y Toquepala.
- Figura 4,2 Ubicación de los proyectos mineros Cuajone y Toquepala.
- Figura 5,1 Mapa de ubicación y acceso de la zona sur del Perú.
- Figura 5,2 Cuadro Tectono-Magmático del Sur de Perú.
- Figura 5,3 Formación del Batolito de la Costa.
- Figura 5,4 Se muestra la deshidratación de la placa subducida (Nazca), hidratación y fusión de la cuña del manto heterogéneo.
- Figura 5,5 Batolito de la Costa, desde Venezuela hasta la Patagonia (Chile y Argentina).
- Figura 5,6 Mapa de ubicación de los principales yacimientos de la franja de pórfidos de Cu-Mo del Paleoceno-Eoceno, el entorno tectónico y rocas intrusivas.
- Figura 5,7 Relaciones de tiempo – espacio de los magmas que dieron origen a las Superunidades que conforman el Batolito de la Costa en la Región Sur del Perú.

- Figura 5,8 Mapa metalogenético del sur del Perú resaltando los sistemas de fallas regionales principales y los dominios geotectónicos.
- Figura 5,9 Relaciones de direcciones de convergencia y los mayores yacimientos porfiríticos entre Perú y Chile.
- Figura 5,10 Arco volcánico en régimen extensión-transtensión durante el Jurásico Medio-Cretácico Inferior.
- Figura 5,11 Arco volcánico en régimen neutral y extensión media en el Paleoceno-Eoceno Inferior.
- Figura 5,12 Arco volcánico en régimen de compresión del Oligoceno Inferior y Mioceno-Plioceno Inferior.
- Figura 5,13 Mapa estructural con los mayores sistemas de fallas translitosféricas y lineamientos, depósitos de pórfidos y proyectos - Sur del Perú.
- Figura 5,14 Imagen Satelital de los depósitos porfiríticos al sur del Perú.
- Figura 5,15 Tipos de rocas de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre – Sur del Perú.
- Figura 5,16 Modelo implícito de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre.
- Figura 5,17 Tipos de alteración de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre – Sur del Perú.
- Figura 5,18 Vista esquemática de un perfil de mineralización para un yacimiento tipo pórfido de cobre con las reacciones que ocurren para cada zona.
- Figura 5,19 Desarrollo del stockwork y la mineralización en los sistemas pórfido de cobre.
- Figura 5,20 Preparación de muestra para solubilización de cobre en ácido sulfúrico.
- Figura 5,21 Preparación de muestra para solubilización de cobre en cianuro de sodio.
- Figura 5,22 Análisis de solubilidades.

- Figura 5,23 Campos de solubilidades de los minerales económicos de cobre en función de sus índices de solubilidad en ácido sulfúrico (ISAC) y cianuro de sodio (ISCN).
- Figura 5,24 Perfil característico de mineralización de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre mostrando la Zona de Oxidación, Zona de Enriquecimiento Supérgeno, Zona Hipógena y Zona Mixta.
- Figura 5,25 Resultados y análisis de muestras por solubilidades en cianuro de sodio y ácido sulfúrico.
- Figura 5,26 Campos y valores establecidos para mineralización de cobre en función de índices de solubilidad en cianuro de sodio y ácido sulfúrico.
- Figura 6,1 Sección A-A' - Modelo de mineralización realizado con datos de logeo geológico.
- Figura 6,2 Sección A-A' - Modelo de mineralización en base a solubilidades.
- Figura 6,3 Sección B-B' - Modelo de mineralización realizado con datos de logeo geológico.
- Figura 6,4 Sección B-B' - Modelo de mineralización en base a solubilidades.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2,1	Frecuencia y ocurrencia (porcentajes) de minerales y elementos supérgenos (S) e hipógenos hidrotermales (H) en depósitos porfiríticos de cobre.
Tabla 2,2	Venillas hipógenas comunes y conjunto de minerales diseminados en depósitos pórfido de cobre.
Tabla 3,1	Operacionalización de variables.
Tabla 4,1	Matriz de consistencia.
Tabla 5,1	Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Transicional.
Tabla 5,2	Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Primarios.
Tabla 5,3	Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Óxidos de cobre.
Tabla 5,4	Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Secundarios.
Tabla 5,5	Minerales económicos de cobre y el comportamiento soluble en ácido sulfúrico y cianuro de sodio.
Tabla 5,6	Minerales de cobre y sus solubilidades en ácido sulfúrico y cianuro de sodio.
Tabla 5,7	Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Óxidos de Cobre.
Tabla 5,8	Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Secundarios.
Tabla 5,9	Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Transicional.

- Tabla 5,10 Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Primarios.
- Tabla 5,11 Índices mínimos y máximos de solubilidades de los minerales económicos de cobre por Cianuro de Sodio y Ácido Sulfúrico.
- Tabla 5,12 Tipificación de la Mineralización para un Yacimiento tipo Pórfido de Cobre en base a análisis de cobre secuencial.
- Tabla 6,1 Análisis Qemscan de muestras contempladas.
- Tabla 6,2 Tipo de Material y Destinos a la que son enviados el material minado proveniente de la operación miner

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El procesamiento de toda la información geológica a través del logeo geológico, mapeos de campo y análisis de muestras de rocas permite la generación del modelo geológico del depósito mineral que implica principalmente los tipos de rocas (litología), tipos de alteraciones y zonas de mineralización. Para yacimientos porfiríticos, el modelo geológico permite determinar las leyes de cobre asignadas para cada bloque de forma estadística. Sin embargo, se presentan irregularidades en estos modelos geológicos en forma de límites abruptos bien marcados entre una zona mineralizada a otra (zonas de mineralización de óxidos de cobre, zonas enriquecidas, zonas transicionales y zonas de sulfuros primarios), conllevando a fuertes variaciones de leyes de cobre total y que puede ser explicado a través del análisis de cobre secuencial (Parkison, G. y Bhappu, R., 1995), el cual está basado en el análisis de cobre soluble en ácido sulfúrico (AsCu), cobre soluble en cianuro de sodio (CNCu) y

cobre residual (CuR), siendo el cobre total o secuencial (TotCu) la suma de los tres anteriores sin involucrar algún otro proceso o elemento geológico (ver ecuación 1.1).

Actualmente se utilizan métodos de análisis fisicoquímicos para determinar la ley de cobre total de forma experimental en laboratorios, así como también la determinación de los valores de solubilidades en ácido sulfúrico, cianuro de sodio (Díaz, R. y Bembow, M., 2003), estos datos se obtienen a partir de los ensayos a muestras de testigos de perforación diamantina y/o muestras de detritos de perforación por aire reverso y/o muestreo de Blastholes y/o muestreo geometalúrgico, toda esta información es recopilada y enviada al área de procesos metalúrgicos para que determinen los parámetros y valores a utilizarse en los procedimientos de recuperación de cobre mediante flotación y lixiviación.

$$\text{TotCu} = \text{ASCu} + \text{CNCu} + \text{CuR} \quad (1.1)$$

Donde:

TotCu: Cobre total o secuencial.

ASCu: Cobre soluble en ácido sulfúrico.

CNCu: Cobre soluble en cianuro de sodio.

En los yacimientos tipo pórfido de cobre, desde el plan de perforación, muestreo, voladura, acarreo, chancado, molienda y recuperación metalúrgico, la roca es sometida por una serie de fases y procesos fisicoquímicos donde finalmente se obtienen los minerales de mena que son separados de la ganga, lo que se busca es que se recupere la mayor cantidad del metal y se obtenga un concentrado de cobre de buena calidad (Condori, Carol, 2020), que es lo que finalmente se comercializa. Es por ello, que

resulta importante que cada proceso y fase cuente con estudios e investigaciones a detalle.

Al formular un zonamiento de la mineralización a partir del análisis de cobre secuencial, se contribuye con una mejor caracterización para las zonas mineralizadas que guarden características, propiedades y comportamientos similares. Mediante la interpretación de estas zonas, se logrará ajustar los parámetros y cantidades de materiales a utilizar de tal manera que mejoren el tratamiento metalúrgico de recuperación, y de ese modo, obtener la mayor cantidad de cobre recuperado en el proceso.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el contexto global de las investigaciones realizadas a los depósitos minerales, los estudios geológicos son por lo general distintos para todo yacimiento mineral, sin embargo, representan una de las principales fuentes de información en todo el proceso de explotación de una unidad minera, los cuales constituyen: la prospección geológica, la exploración y la evaluación de recursos y reservas minerales, así mismo, una de las principales dificultades es la integración de los conceptos geológicos con los datos tomados de campo generando una incertidumbre en la conceptualización de los modelos geológicos, el problema radica cuando los datos geológicos tomados en estos estudios son de forma errónea o mal interpretados, conllevando a que la elección de los criterios y parámetros a utilizar en los métodos de minado y tratamiento metalúrgico no sean los correctos o más acertados, esto traduciéndose en pérdidas económicas significativas para las empresas mineras, por lo

que el tratamiento de toda información geológica define muchas veces o casi siempre decisiones importantes en el desarrollo de una unidad minera.

De las etapas que componen el proceso minero, la recuperación es sin duda una de las etapas con mayor relevancia, pero también un proceso donde se presentan problemas debido a que depende de muchos datos experimentales y teóricos brindado por otras áreas, como los análisis de ensayos en laboratorios y la base geológica del yacimiento enfocado en los procesos hidrotermales que dieron lugar a la mineralización. Los problemas experimentales están ligados al incorrecto muestreo, inadecuada preparación de muestras y deficiente análisis fisicoquímico en los laboratorios, por otro lado, los problemas teóricos están relacionados principalmente por la deficiente comunicación entre el área de geología y el área de procesos metalúrgicos en la explicación de la base geológica conceptual en términos elementales precisando los conceptos de mayor interés y que causan un impacto negativo en la recuperación del cobre. Adicionalmente, la heterogeneidad geológica de la mineralización que presentan los yacimientos porfiríticos, como se muestra en la figura 1,1, también juegan un papel importante en este proceso (ver figura 1,1). La recuperación estará en función de otros factores propios para cada zona mineralizada, como la cantidad y tipos de arcillas totales, los minerales de cobre presentes y la ley total estimada, lo que dificulta una mayor recuperación de cobre cuando no se tiene una correcta caracterización para cada zona mineralizada.

Así mismo, otro problema habitual que se tiene en la etapa de recuperación del cobre es el grado o porcentaje de recuperación del mineral económico de interés por los procesos de flotación y lixiviación, esto es controlado principalmente por distintos

factores como el tipo de mineral, tamaño de partícula, concentración de los solventes y la temperatura (Rojas, F., 2020). Al realizar y comparar el cobre total recuperado en los balances de reconciliación entre los modelos geológicos (valores estimados y calculados mediante la geoestadística) y los reportes cuantificados obtenidos del proceso metalúrgico (valores reales), generalmente se tienen resultados equivalentes, pero cuando estos dos resultados se contrastan con valores elevados impactan directamente en la producción del yacimiento, debido a que todo proyecto minero está asociado al aspecto y criterios económicos, cuyos valores son empleados para generar el ciclo minero que abarcan la tasa de explotación, costos de capital/operación y ley de corte del cobre.

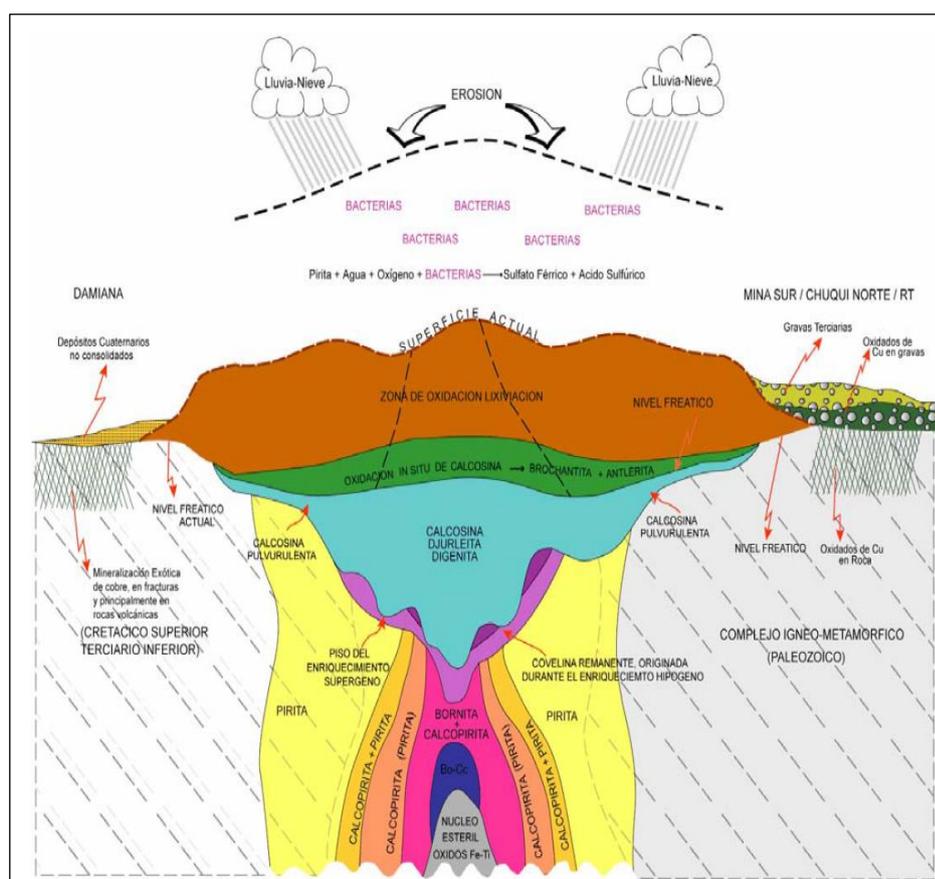


Figura 1,1 Perfil de mineralización para un depósito Pórfido de Cobre donde se observa la heterogeneidad mineralógica para cada zona mineralizada.

*Fuente: “Mineralogía magnética y paleomagnetismo en los megayacimientos tipo pórfido cuprífero Chuquicamata y El Teniente, Chile”, Townley. B. y Astudillo, N. (2008)

Por otro lado, existe limitada información o investigaciones recientes que mejoren los parámetros y métodos para la clasificación de los dominios mineralógicos en este tipo de yacimiento, los insuficientes estudios en una unidad minera para una tipificación adecuada de cada zona mineralizada de cobre a partir de la unificación de la información geológica y el análisis de cobre secuencial mediante la solubilización en ácido sulfúrico y cianuro de sodio, repercute negativamente en la elección del destino para el tratamiento metalúrgico del material minado.

En base a las situaciones descritas anteriormente se formula la siguiente pregunta para la investigación:

¿En qué grado influye un incorrecto zonamiento de la mineralización en un yacimiento tipo pórfido a partir del análisis secuencial de cobre ligado al grado de recuperación?

1.3 Objetivo

- Formular un zonamiento geológico eficaz de la mineralización en un yacimiento tipo pórfido de cobre a partir del estudio de las solubilidades de los minerales económicos con la finalidad de mejorar su grado de recuperación.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Ámbito internacional

Sillitoe, H. (2010) señala en su publicación “Porphry Copper Systems”, los sistemas pórfido de cobre están definidos en franjas lineales de cientos de kilómetros de largo, pero también ocurre con menor frecuencia en aparente aislamiento. Sustenta, que estos sistemas se encuentran estrechamente relacionados a plutones subyacentes a paleo-profundidades entre 5 y 15 km., los cuales son cámaras de suministro para los

magmas y fluidos que formaron los intrusivos con una geometría verticalmente elongada (> 3 km). Señala que la geología y la composición de la roca caja influyen en el tamaño, grado y tipo de mineralización de los sistemas pórfidos de cobre.

Determina que los procesos hidrotermales en los depósitos pórfido de cobre llegan a alterar cientos de kilómetros cúbicos de roca con un zonamiento desde el centro del sistema hacia la periferia o bordes de los stocks o intrusivos, que normalmente comprenden varios pulsos porfiríticos de diferentes edades con composiciones de rocas intermedias o félsicas. Explica, que los procesos de alteración y mineralización se encuentran con un zonamiento desde la parte más profunda del sistema con una mineralización estéril y alteración calcosódica temprana, seguido de una alteración potásica potencialmente mineralizada, pasando a una alteración clorítica y sericítica hasta abarcar la parte superficial del sistema con una alteración argílica avanzada, este último constituyendo lithocaps los cuales alcanzan espesores mayores a 1 km si no han sido afectados por una erosión significativa. Sostiene que los ensambles de calcopirita +/- bornita son característicos de las zonas potásicas, mientras que los minerales de alta sulfuración se generan progresivamente hacia la parte somera relacionado con el descenso de la temperatura y coincidiendo con zonas con mayor grado de hidrólisis.

Señala también, que los sistemas pórfidos de cobre comienzan mediante la inyección de magmas oxidados y saturación con fluidos acuosos ricos en azufre (S) y metales provenientes de las cúpulas de los plutones parentales subyacentes. Determina que la secuencia de eventos de alteración y mineralización son principalmente una consecuencia del enfriamiento progresivo de las rocas y fluidos hidrotermales, desde temperaturas mayores a 700°C a menores de 250°C, causado principalmente por la

solidificación de los plutones y la transición litostático-hidrostatico. Precisa, que una vez que los intrusivos se emplazan, el líquido y vapor hipersalino bifásico de alta temperatura, responsable de la alteración potásica y mineralización contenida a profundidad, asciende hacia las zonas superficiales y da paso a un líquido monofásico de baja a moderada salinidad con temperaturas menores a 350°C, que causa la alteración sericita-clorita y sericita y su mineralización asociada, este mismo líquido también causa la mineralización de las partes periféricas de los sistemas, incluyendo los lithocaps.

John, D., *et al.* (2010) establecen en su publicación “Porphyry Copper Deposit Model” que, en un yacimiento tipo pórfido de cobre y molibdeno, los minerales predominantes en la zona hipógena son las calcopirita-molibdenita, encontrándose principalmente en casi todos los depósitos, y la bornita, que se encuentra en aproximadamente el 75% de los depósitos. Mencionan, que otros minerales hipógenos que comúnmente se encuentran asociados a los minerales de cobre son el cuarzo, pirita, sericita, clorita, epidota, biotita, feldespato potásico, magnetita y anhidrita. Explican también, que los minerales de cobre y molibdenita se presentan en varias formas: (1) diseminados como cristales anhedrales o subhedrales de tamaños menores a 1mm reemplazando a los feldespatos o en forma de cúmulos asociados a biotita hidrotermal y otros minerales de silicatos y sulfatos; (2) en venillas, asociado a cuarzo, pirita y otros minerales hipógenos; y (3) en matrices de brechas asociado a cuarzo.

El mineral supérgeno contiene minerales de cobre extraíbles que fueron precipitados por el descenso y bajo pH de las aguas subterráneas que disolvieron minerales hipógenos de cobre y volvieron a ser depositados en ambientes oxidantes de baja

temperatura. Sostienen en su investigación, que la roca porosa de donde los minerales de cobre hipógenos han sido removidos junto con otros componentes son denominados zonas lixiviadas y, la meteorización y el enriquecimiento están controlados por muchos factores que incluyen; la permeabilidad proporcionada por fallas, fracturas y venillas, la configuración mineralógica, la intensidad de erosión y oxidación (clima), el tectonismo, la topografía y el tiempo. Mencionan, que los minerales supérgenos están constituidos en dos zonas, la zona enriquecida (calcosina, covelita) que son de mayor ley que el mineral hipógeno, y la zona con minerales óxidos de cobre (malaquita, azurita, cuprita, tenorita, crisocola, cobre nativo y atacamita) que son relativamente de mayor o menor ley que las fuentes de mineral hipógenos. La recuperación de estos minerales supérgenos se da a un costo relativamente bajo mediante la disolución ácida y la precipitación del metal.

Los tipos de minerales en un yacimiento tipo pórfido de cobre constituyen casi en su totalidad minerales de ganga hipógenos y supérgenos, las propiedades físicas y químicas de los minerales de ganga, junto con las leyes de cobre, molibdeno y oro, determinan la viabilidad de extracción de estos depósitos.

Rojas, Freddy (2020) realiza una importante investigación de tesis de maestría y la presenta con el nombre “Modelamiento Geoestadístico de la Lixiviabilidad de un Yacimiento de Cobre”, donde explica la aplicación e implementación de los criterios económicos más importantes a los modelos geológicos, para determinar y conocer la viabilidad de los proyectos mineros y, por consiguiente, la explotación y operación minera. Detalla en su trabajo que los parámetros más importantes son los costos de producción, precios de venta y la recuperación minera y metalúrgica del mineral. Su

estudio se basa principalmente en el análisis de recuperación metalúrgica del cobre bajo los conceptos de solubilidades sobre la base de la lixiviación a muestras representativas de sondajes de perforación diamantina, empleando dos agentes lixivadores para la disolución del cobre, los cuales son el cianuro de sodio y el sulfato férrico.

Para los yacimientos tipo pórfido de cobre se les da mucha importancia a los modelos geológicos tridimensionales y modelo de bloques, que son los que contienen la mayor información geológica del yacimiento mineral, menciona que con esta información se realizan los modelos económicos que son los que establecen la evaluación de las reservas minerales y el diseño óptimo de explotación.

Respecto a la información de entrada requerida para el programa de evaluación económica del yacimiento, sostiene que se tiene como uno de los puntos principales a la recuperación metalúrgica ya sea por minería química o minería por disolución, en donde señala que emplear la hidrometalurgia para la recuperación de cobre por lixiviación de minerales sulfurados, está siendo tomado de gran interés en la actualidad. Es por ello, que en su investigación busca predecir las leyes de cobre y el porcentaje de recuperación en unidades geológicas definidas, determinadas a partir de la construcción de modelos estadísticos predictivos, tomando como base en conjunto a: las leyes de los minerales principales (cobre total y sobre soluble), las leyes de minerales sulfurados de cobre (calcosina, covelina y calcopirita) y el análisis de cobre secuencial mediante el estudio de las solubilidades (grado de recuperación).

1.4.2 **Ámbito nacional**

Valdivia, V., Toro, J., Mamani, M. y Terán, J. (2014) publican el artículo “Chipispaya: un pórfido Cu-Au del Mioceno Inferior en el sur del Perú”, en la que sustentan una nueva franja metalogénica de pórfidos de Cu-Au de edad Mioceno inferior que se encuentra superpuesta a la franja de pórfidos Cu-Mo de edad Paleoceno en el sur del Perú.

Para sostener la investigación se basan en la existencia del pórfido Chipispaya, el cual según estudios geológicos, estructurales, geocronológicos y geoquímicos, determinan que el pórfido de estudio se diferencia de los demás por ser más reciente con edad comprendida entre los 24.11 y 22.46 Ma, según las dataciones sobre sericita, alunita y molibdenita; por otro lado, Martínez, W. y Cervantes, J. (2003), dataron lavas andesíticas cercanas a Chipispaya, reportando edades similares comprendidos entre los 24 y 21 Ma.

El control estructural regional está relacionado con el sistema de fallas Incapuquio de rumbo noroeste (NW) y a una escala distrital se encuentra asociado a fallas con rumbo nor-noroeste (NNW) del sistema de fallas Incapuquio, formando una zona de debilidad en forma lenticular por donde se emplazaría el pórfido Chipispaya. Según los estudios estratigráficos presentados, regionalmente el pórfido Chipispaya se emplazó asociado al Grupo Yura (Jurásico superior a Cretácico inferior, 166 – 135 Ma) y Grupo Toquepala (Cretácico superior a Paleógeno, 100 – 53 Ma) y, localmente asociado a volcánicos andesíticos con edades de 21.6 Ma datado por K-Ar y 24.6 Ma datado por Ar-Ar; en base a ello se sugirió que las andesitas son co-magmáticas con

el pórfido Chipispaya, por lo cual se infiere que podría estar asociado con una de las subfronteras de Maricunga-Chile (Mpodosis, C., Cornejo, P., Kay, S. y Titler, A., 1995).

Valdivia, V., Mamani, M., Toro, J. y Terán, J. (2015) presentan una importante publicación que tiene como título “Aplicación de la Geocronología y Litogeoquímica a la Exploración de Pórfidos en el Paleoceno”, en la que sustentan la geocronología y evolución del emplazamiento en el Paleoceno (66 – 56 Ma) de los pórfidos Cerro Verde, Cuajone, Quellaveco y Toquepala, asociados a la Super Unidad Yarabamba. En el estudio muestran que el sistema de fallas Incapuquio es muy importante para el emplazamiento de los pórfidos Cu-Mo al sur del Perú, adicional a ello se menciona la existencia de estructuras en dirección noreste (NE) ubicadas entre Tacna y Arequipa (Valdivia, J., Torres, A. y Montoya, C., 1995), estas fallas NE dan origen a bloques a manera de horns y grabens que favorecerían el emplazamiento de los pórfidos.

Edades de U/Pb, Ar/Ar, K/Ar y Rb/Sr muestran la existencia migratoria del Batolito de Yarabamba y de los intrusivos mineralizados, que empezó desde Cerro Verde, con edades entre 62.2 +/- 2.9 Ma a 56.0 +/- 2.0 Ma (Quang, C., Clark, A., Lee, J. y Guillen, J., 2003; Bidgood, T., 2000), migrando hacia el Sur, con presencia de rocas más jóvenes para; Cuajone de 57.0 a 52.15 Ma (Simmons, Adam 2013; Concha, D. y Valle, J., 2000), Quellaveco de 58.41 +/- 0.57 Ma a 53.6 +/- 11.6 Ma (Simmons, Adam, 2013; Sillitoe, R. H. y Mortensen, J., 2010), y Toquepala de 57.1 +/- 0.57 Ma a 54.5 +/- 1.5 Ma (Simmons, Adam, 2013; Mattos, R. y Valle, J., 1999; Quang, C., Clark, A., Lee, J. y Guillen, J., 2003). Presentan muestras analizadas del intrusivo Santa Rosa (Cerro Verde) donde se determinan ratios Sr/Y con valores ≥ 20 , esto significa que las demás intrusiones porfiríticas podrían tener ratios parecidos, es oportuno mencionar que el

estudio de los ratios Sr/Y en los sistemas porfiríticos de edad Paleoceno están comprendidos en un rango de ≥ 20 y ≤ 120 (Loucks, R., 2012), aunque resaltar que no todos los pórfidos presentan esta aparente asociación de ratio Sr/Y, por lo que es tema aún de discusión, sin embargo, podría usarse como datos guías en la exploración de yacimientos (Chiaradia, M., *et al.*, 2012).

Martinez, W., Marchena, A. y Otero, J. (2019) establecen en su publicación “Controles Litogeoquímicos en la Mineralización Tipo Pórfido de Cobre en el Sur del Perú”, que los patrones geoquímicos y tectónicos que controlan la fertilidad de un pórfido son: el contenido de agua y volátiles, estado de oxidación magmático, variabilidad del espesor cortical, entre otros. Explican, que para determinar las condiciones favorables para la formación de un depósito porfirítico se toma como referencia el estudio de patrones geoquímicos de los elementos de tierras raras (REE), si bien los REE no tienen ninguna relación con el contenido metálico del yacimiento, ayudan a determinar condiciones favorables en la formación del depósito, como la temperatura, la presión, el contenido de agua y el estado de oxidación del magma.

Para los pórfidos jurásicos Tía María y La Tapada, se adecua más a un modelo de adelgazamiento cortical asociado a sistemas de fallas transtensionales y relacionados con el vulcanismo Guaneros. Para la Super Unidad Punta Coles se da el favorecimiento de depósitos porfiríticos ricos en Cu-Au debido a la alta hidratación en un contexto de corteza delgada. Mencionan, que en el Cretácico superior – Paleógeno se tienen datos litogeoquímicos que detallan tres factores principales que dieron origen a la formación de sistemas porfiríticos; (1) deshidratación del slab (llevando a la hidratación y metasomatismo de la cuña astenosférica suprayacente; (2) condiciones de presión y

temperatura para la formación de facies anfíbolíticas que sean capaces de la retención de agua en su estructura cristalina y; (3) el posterior engrosamiento cortical y la liberación de agua de los anfíboles por matasomatismo a medida que la corteza inferior llegaba a un equilibrio mineralógico de una facie eclogítica compuesto principalmente por granates. Sostienen, que para el mioceno se presume que el pórfido Chipispaya se originó por un adelgazamiento cortical lo que permitió el ascenso de magmas a través de sistema de fallas Incapuquio.

Vargas, Jim J. (2019) menciona en su tesis que tiene como título “Pruebas metalúrgicas integral para el tratamiento de un pórfido de Cu-Mo en la unidad de Porvenir – Compañía Minera Milpo – 2019”, que es muy importante obtener datos preliminares de ensayos a muestras representativas a nivel integral del yacimiento, con el fin de realizar diseños y modelos de flotación de cobre para optimizar la recuperación, finalmente, proporcionar la información detallada a planta de procesos metalúrgicos de tal forma que permita ajustar la cantidad de reactivos utilizados y los parámetros para la recuperación de cobre a través del análisis experimental.

A partir de muestras seleccionadas de testigos de perforación diamantina y tomando como criterios geológicos principales la litología, alteración y mineralización, realiza una caracterización química, física, mineralógica y análisis de cobre secuencial, en donde determina y selecciona por separado muestras con contenido de óxidos de cobre, sulfuros secundarios de cobre y sulfuros primarios de cobre, estas muestras representativas por tipo de mineralización fueron compositados y analizados por el autor, para determinar las óptimas condiciones en el proceso de flotación con la finalidad de obtener la mayor recuperación del cobre total.

Condori, Carol (2020) presenta su trabajo de tesis “Evaluación de las cinéticas de flotación de Cu de un mineral mixto a partir de análisis de cobre secuencial”, en donde explica la dificultad y poca eficiencia que se tiene en el proceso de recuperación por el método de flotación de minerales sulfurados de cobre, cuando estos están combinados con altos contenidos de óxidos de cobre en el material a flotar, por lo que gran parte de los minerales de cobre oxidados no se logra recuperar y por lo tanto desechados en el material de relave, teniendo un impacto negativo en la recuperación del cobre total (CuT).

Para un mineral mixto con altos contenidos de óxidos de cobre, determinó muestras representativas y realizó pruebas metalúrgicas experimentales realizados en un laboratorio, donde evaluó el comportamiento cinético de flotación del cobre soluble en ácido sulfúrico (CuSAc), cobre soluble en cianuro de sodio (CuSCN) y cobre residual (CuR), mediante el método de análisis de cobre secuencial, cuyos resultados le permitieron plantear un balance metalúrgico para cada ensayo de solubilidades y en consecuencia definir y evaluar parámetros cinéticos de flotación que mejoren la recuperación. De igual modo, sustentó y propuso reactivos de dosificación en el proceso de flotación, que conllevan finalmente a una mejor recuperación del mineral oxidado de cobre y, por lo tanto, mejor recuperación del cobre total.

CAPÍTULO II

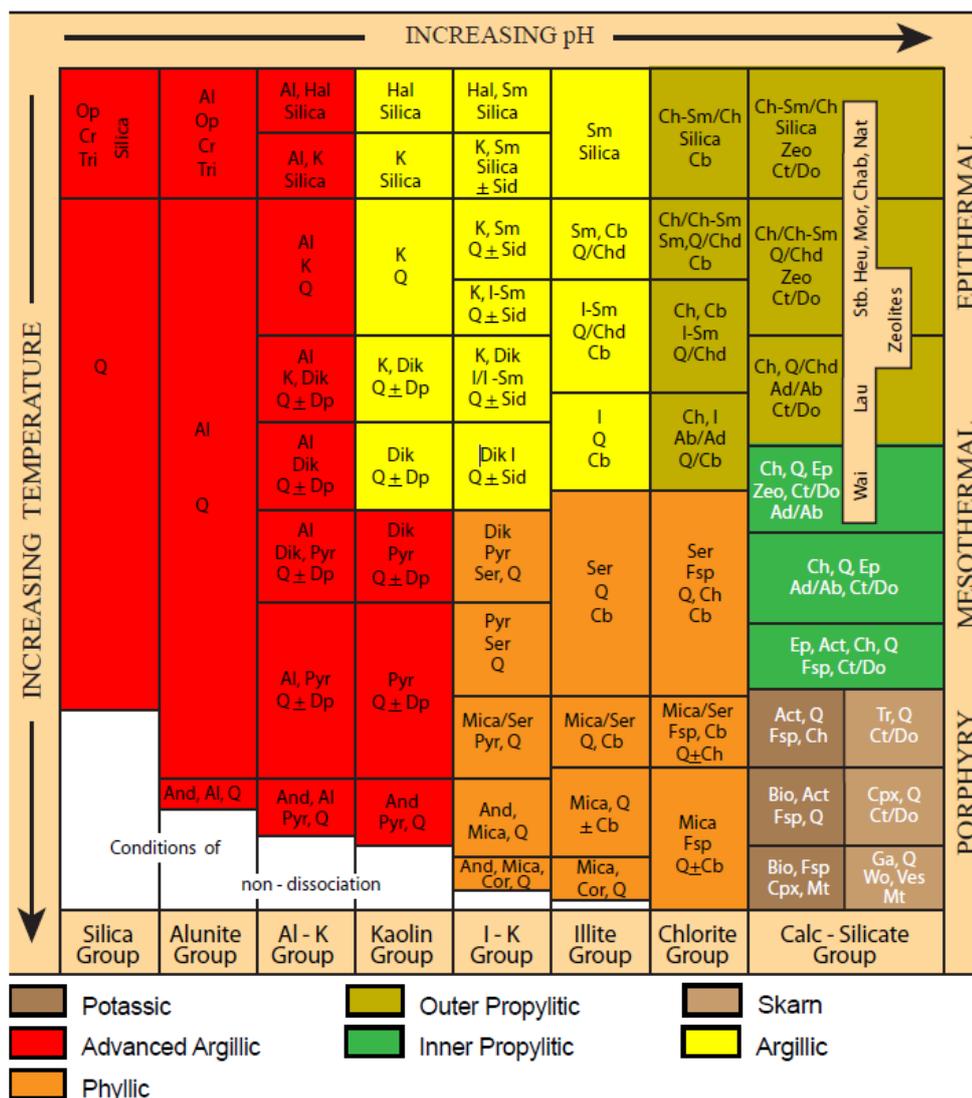
MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Zonamiento y alteraciones hidrotermales

Corbett, Greg (2018) – “Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration”, la alteración hidrotermal representa cambios en la mineralogía principalmente por la interacción de la roca caja con los fluidos hidrotermales relacionados con el proceso de mineralización. Las alteraciones hidrotermales abarcan un cambio mineralógico, textural y químico de las rocas que fueron sometidos a fluidos hidrotermales compuesto de agua caliente, vapor y/o gases, adicional a ello, este proceso hidrotermal ocasiona la formación de nuevos minerales, la precipitación y la disolución de otros, también se da intercambios iónicos entre los minerales formadores de la roca caja y el fluido caliente que circuló a través de la misma, el grado o intensidad de alteración dependerá principalmente del ratio agua/roca. En efecto, la

temperatura, pH y EH del fluido hidrotermal son los factores más notables en la mineralogía resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la composición mineralógica de la roca.



Abreviaciones: Ab - albita; Act - actinolita; Ad - adularia; Al - alunita; And - andalusita; Bio - biotita; Cb - carbonato; (Ca, Mg, Mn, Fe); Ch - clorita; Chab - cabazita; Chd - calcedonia; Ch-Sm - clorita-esmectita; Cor - corindón; Cpx - clinopiroxeno; Cr - cristobalita; Ct - calcita; Do - dolomita; Dik - dickita; Dp - diaspora; Ep - epidota; Fsp - feldespato; Ga - granate; Hal - halloysita; Heu - heulandita; I - illita; I-Sm - illita-esmectita; K - caolinita; Lau - laumontita; Mt - magnetita; Mor - mordenita; Nat - natrolita; Op - sílice opalina; Pyr - pirofilita; Q - cuarzo; Ser - sericita; Sid - siderita; Sm - esmectita; Stb - estibnita; Tr - tremolita; Tri - tridymita; Ves - vesuvianita; Wai - wairakita; Wo - wollastonita; Zeo - zeolita.

Figura 2,1 Minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales.

*Fuente: "Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration", Corbett, G. (2018) - modificado de Corbett, G y Leach, T. (1998).

La figura 2,1, elaborado por Corbett, G. y Leach, T. (1998) y modificado por Greg Corbett (2018), representa un gráfico base para cualquier discusión referente a las alteraciones hidrotermales asociados con la mineralización epitermal y de pórfido, en base al pH y la temperatura se agrupa los minerales de alteración como: (1) grupos de minerales esenciales con un pH constante de formación, pero con variaciones de temperatura como indica la columna vertical y (2) de acuerdo con la terminología de uso común en la industria de exploración minera para describir los conjuntos de minerales de alteración hidrotermal.

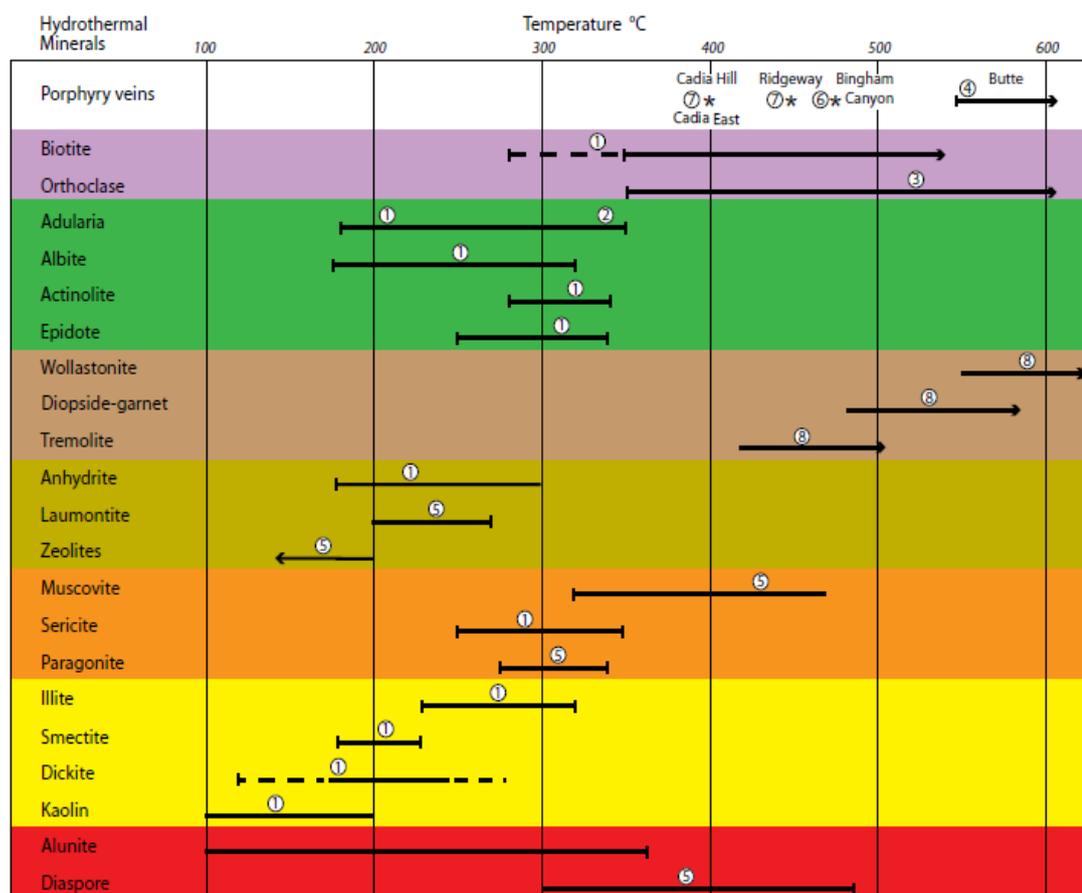


Figura 2,2 Rangos de temperatura para la formación de las alteraciones hidrotermales.
 *Fuente: "Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration", Corbett, G. (2018) - modificado de Corbett, G y Leach, T. (1998).

Corbett, G. y Leach, T. (1998), elaboran un gráfico donde los grupos de minerales comunes ubicados en las columnas verticales de la figura 2,1, se han categorizado dentro de los rangos de temperatura (ver figura 2,2) a partir de los análisis de sistemas geotérmicos y otras investigaciones.

2.1.2 Mineralización hipógena de yacimientos porfiríticos

John, D., et al. (2010) – “Porphyry Copper Deposit Model”, la mineralización en los depósitos tipo pórfido de cobre se encuentra en la roca en la que la concentración, valor, ubicación y recuperación de cobre, +/-molibdeno, +/-oro, permiten la extracción bajo requisitos económicos predeterminados. El mineral hipógeno contiene minerales de cobre, molibdeno y otros minerales hidrotermales depositados por fluidos de alta temperatura calentados o derivados de magmas. Las leyes de mineralización hipógena de cobre varían considerablemente desde varias décimas hasta más de 1%, las leyes de molibdeno hipógeno también varían desde menos de 0.001% hasta 0.1% (Singer, D., et al., 2008). La ley media de molibdeno hipógeno para estos tipos de yacimientos es de 0.013% y este valor no suele cambiar debido a que no ocurre químicamente un enriquecimiento de este elemento por procesos supérgenos.

Los principales minerales de cobre hipógenos son la calcopirita y la bornita, y el único mineral de molibdeno de importancia es la molibdenita (ver tabla 2,1). Se recuperan cantidades menores de cobre hipógeno a partir de digenita, covelina, enargita, tetraedrita y tenantita. Covelina, enargita y digenita están presentes principalmente en zonas ricas en pirita asociado a la alteración argílica avanzada formados y preservados en pocos depósitos tipo pórfido de cobre. La tetraedrita y la tenantita se asocian tanto

con alteración sericítica (zona fílica) como con la alteración argílica avanzada. Se cree que la plata y el oro se encuentran en la calcopirita y la bornita y el renio está contenido en la molibdenita. Los minerales de mena hipógenos son técnicamente minerales recuperados por su contenido de cobre +/- molibdeno +/- oro, pero el término mineral de mena hipógena o mineral de mena, se aplica ampliamente a los minerales de cobre y molibdeno en todo un depósito, independientemente de la viabilidad minera.

Respecto a los ensambles mineralógicos, los minerales hipógenos de cobre y molibdeno se forman con otros minerales hidrotermales en grupos llamados ensambles. Estas asociaciones de minerales hipógenos ocurren a través de venillas y matrices de brechas, también reemplazando minerales primarios (feldespatos, biotita, anfíboles, piroxenos) y fragmentos de roca caja. La bornita, calcopirita y molibdenita se encuentran comúnmente con cuarzo hidrotermal, pirita, feldespato potásico, biotita, magnetita y mica potásica (alteración potásica y sericítica – ver tabla 2,2) en una gran variedad de ensambles relacionados con la temperatura, pH, estado de sulfuración y estado de oxidación del fluido hidrotermal (Seedorff, E., *et al.*, 2005). El mineral hipógeno de baja ley en zonas de alteración potásica, sericítica y argílica avanzada, está en contacto en zonas proximales a la alteración propilítica (cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, calcita, epidota y clorita – ver tabla 2,2). Los ensambles de alteración sódica y calco-sódica (principalmente albita y/o plagioclasa sódica, actinolita, clorita, epidota – ver tabla 2,2) están presentes generalmente por debajo de la alteración potásica.

Los minerales sulfuros de cobre y molibdeno típicamente comprenden de 1 a 2% en volumen del mineral hipógeno. Se presentan en tres formas de texturas que están

presentes de manera variable en todos los yacimientos porfiríticos de cobre: (1) minerales de cobre y molibdeno, principalmente calcopirita, bornita y molibdenita, diseminados en las rocas hospedantes; (2) mineras de cobre y molibdeno en venillas; y (3) minerales de cobre y molibdeno en matrices de las brechas. La mayoría de los minerales de cobre hipógenos se diseminan en rocas hospedadoras como cristales anhedrales o subhedrales de 1mm a menos o se presentan en agregados en forma de coágulos de tamaños milimétricos a centímetros en conjunto con otros minerales hipógenos (cuarzo, pirita, feldespato potásico, micas potásicas, anhidrita y biotita).

Tabla 2,1 Frecuencia y ocurrencia (porcentajes) de minerales y elementos supérgenos (S) e hipógenos hidrotermales (H) en depósitos porfiríticos de cobre. Grupo A incluye minerales y elementos (O). Minerales en el grupo B (minerales de sulfuros y teluros) y minerales del grupo C (silicatos). Minerales del grupo D (óxidos), minerales del grupo E (sulfatos, fosfatos y fluoruros), minerales del grupo F (carbonatos), y G1 y G2 (otros minerales) que rara vez se recuperan y consideran ganga en la mayoría de los depósitos tipo pórfidos de cobre.

A. Ore minerals	Percentage of deposits		B. Sulfide and telluride minerals	Percentage of deposits		C. Silicate minerals	Percentage of deposits	
Chalcopyrite CuFeS_2	98.2	H; O	Pyrite FeS_2	100	H	Quartz/silica SiO_2	100	H S
Bornite Cu_3FeS_4	75.5	H; O	Sphalerite ZnS	45.5	H	Muscovite/sericite $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	86.4	H
Chalcocite/digenite/djurleite $\sim\text{Cu}_2\text{S}$	55.5	S; H; O	Galena PbS	41.8	H	Chlorite $(\text{Ca},\text{Na},\text{K})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_9(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{10}\cdot n(\text{H}_2\text{O})$	80.9	H
Tetrahedrite/tennantite $(\text{Cu},\text{Fe})_{12}(\text{Sb},\text{As})_4\text{S}_{13}$	32.7	H; O	Pyrrhotite FeS	19.1	H	Epidote $\text{Ca}_2(\text{Fe},\text{Al})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	69.1	H
Enargite/luzonite/ famatinite $\text{Cu}_3(\text{As},\text{Sb})\text{S}_4$	22.7	H; O	Marcasite FeS_2	12.7	H	Biotite/phlogopite $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2]$	65.5	H
Molybdenite MoS_2	70.9	H; O	Arsenopyrite FeAsS	8.2	H	K-feldspar KAlSi_3O_8		H
Gold Au	61.8	H; O	Tellurides	8.2	H	Kaolinite/illite/dickite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	50	H S
Silver Ag	8.1	H; O				Actinolite $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	29.1	H
Electrum (Au,Ag)	11.6	H; O	Others: cobaltite (CoAsS), bravoite ($\text{Fe},\text{Ni},\text{Co}$) S_2 , arsenosylvanite ($\text{Cu}_3(\text{As},\text{V})\text{S}_4$)		H	Pyrophyllite $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	20.9	H
Covellite CuS	51.8	S; H; O				Montmorillonite/smectite $(\text{Na},\text{Ca})_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot n(\text{H}_2\text{O})$	19.1	H S
Azurite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	45.5	S; O				Garnet $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	15.5	H
Cuprite Cu_2O	25.5	S; O				Zeolite $\text{NaCa}_4[\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}] \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	17.3	H
Tenonite CuO		S; O				Tourmaline $\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	14.6	H
Chrysocolla $(\text{Cu},\text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot n(\text{H}_2\text{O})$	22.7	S; O				Albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	13.6	H
Copper Cu	20	S; O				Diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	7.3	H
Brochantite $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	8.2	S; O				Zunyite $\text{Al}_{13}\text{Si}_2\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_{18}\text{Cl}$	5.5	H
Chalcanthite $\text{CuSO}_4\cdot 5(\text{H}_2\text{O})$		S; O						
Antlerite $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$		S; O						
Other Cu oxide minerals: neotocite, malachite, ³ atacamite, plancheite, turquoise, libethenite, olivenerite, chalcophyllite, metatorvermite, chenevixite, krohnkite, natrochalcite		S; O						

D. Fe, Al, Ti oxide minerals	Percentage of deposits		E. Sulfate, phosphate, fluoride minerals	Percentage of deposits		F. Carbonate minerals	Percentage of deposits	
Magnetite Fe ₃ O ₄	74.6	H	Anhydrite/gypsum	46.2	H	carbonate/calcite CaCO ₃	38.2	H
Hematite/specularite Fe ₂ O ₃	59.1	H S	Alunite KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	25.5	H S	siderite	7.3	H
Goethite/limonite	35.5	S	Jarosite KFe ³⁺ ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	17.3	H S			
Diaspore AlO(OH)	16.4	H S	Apatite Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F,Cl)	12.7	H			
Rutile TiO ₂	10	H	Barite BaSO ₄	12.7	H			
			Fluorite CaF ₂	10	H			
G1. Other minerals (5–1 percent of deposits)			G2. Other minerals (less than 1 percent of deposits)					
Sulfur, turquoise, andalusite, bismuth, Bi minerals, bismuthinite, cubanite, graphite/organic, serpentine, stannite, stibnite, wad/ manganite/ psilomelane/ pyrolucite/Cu-wad, corundum, millerite/ polydymite/ violarite/mackinawite/ heazlewoodite, scheelite/powellite, urananite/ pitchblende, ankerite, topaz			Acanthite, Al oxides arsenates bastnaesite, cassiterite, cerussite, chromite, cinnabar, emplectite, jamesonite, opal, scheelite/ powellite, scorodite, selenide, sphene, wolframite, wollastonite, vallerite, woodhouseite, svanbergite					

*Fuente: Tomado de "Porphyry Copper Deposit Model", John, D., et al. (2010).

Tabla 2,2 Venillas hipógenas comunes y conjunto de minerales diseminados en depósitos pórfido de cobre.

Alteration type	Silicate+sulfide+oxide assemblage	Other minerals sometimes present	Common relict igneous	Notes	Common vein minerals
	Found in most deposits				
Potassic (all with rutile)	Quartz+K-feldspar+magnetite Quartz+K-feldspar+biotite±magnetite±bornite Quartz+K-feldspar+biotite±magnetite±chalcopyrite±pyrite Quartz±K-feldspar+biotite+molybdenite±pyrite	Anhydrite Tourmaline, anhydrite, apatite, fluorite, TiO ₂ Albite, topaz, ilmenite	Albite Albite Albite	Lots of these are chalcopyrite-bornite as well No arsenopyrite, does not coexist with pyrite-chalcopyrite	Magnetite±quartz. Quartz+bornite±chalcopyrite±magnetite±anhydrite±calcite. Quartz+chalcopyrite±pyrite±molybdenite±magnetite±anhydrite±calcite Quartz+molybdenite (B veins).
Sericitic (all with rutile)	Quartz+sericite (K-mica)+chalcopyrite+pyrite±molybdenite Quartz+sericite (K-mica)+pyrite±sphalerite Quartz+sericite (K-mica)±chlorite+pyrite	Tourmaline, anhydrite Tourmaline, tennantite, galena, magnetite, hematite, albite, Fluorite, apatite			Pyrite+quartz±chalcopyrite±tourmaline. Hematite+quartz±pyrite. Pyrite+bornite+quartz±sphalerite. Pyrite+galena+sphalerite+quartz±tetrahedrite±hematite±rhodochrosite.
Propylitic	Albite+K-feldspar+epidote±actinolite±chlorite±hematite	Magnetite, pyrite, sericite, calcite, TiO ₂	K-feldspar, albite	This more like porphyry environment	Calcite, epidote.
Advanced argillic (all with TiO ₂)	Quartz+andalusite+pyrite Quartz+pyrophyllite+pyrite±alunite±enargite±tetrahedrite Quartz+kaolinite/dickite+pyrite±alunite±enargite±tetrahedrite	Diaspore, corundum, topaz, dumortierite, zunyite, TiO ₂ Chalcocite, covellite, hematite			Pyrite±quartz±enargite±covellite±tetrahedrite. Alunite+quartz.
Sodic-calcic	Na-plagioclase+actinolite+titanite±epidote±diopside	Chlorite, calcite, calcium-garnet			Actinolite.
Sodic Intermediate argillic (SCC)	Albite+chlorite+epidote+pyrite Quartz+illite/montmorillonite±calcite±pyrite±chlorite	Tourmaline, TiO ₂ Sericite, albite, epidote, kaolinite	Albite K-feldspar, albite		Epidote. Pyrite. None.
Greisen	K-feldspar+muscovite	Biotite	K-feldspar	Deep paired veins and envelopes	Muscovite+quartz+pyrite>chalcopyrite.

*Fuente: Tomado de "Porphyry Copper Deposit Model", John, D., et al. (2010)

2.1.3 Mineralización supérgena de yacimientos porfiríticos

John, D., et al. (2010) – Porphyry Copper Deposit Model, indica que el mineral supérgeno contiene minerales de cobre extraíbles y muchos otros minerales precipitados producto del bajo pH de las aguas subterráneas que disolvieron minerales de cobre hipógenos y volvieron a depositar cobre en minerales estables bajo ambientes oxidantes de baja temperatura. Durante la formación del mineral supérgeno, el agua subterránea descendiente se acidifica producto de la disolución de la pirita, que simultáneamente provoca la disolución de los minerales de cobre hipógenos. Numerosos ciclos de disolución-precipitación conducen a la reconcentración del cobre en depósitos subyacentes lateralmente extensos conocidos como depósitos de óxidos de cobre y mantos de enriquecimiento de calcosina o zonas de sulfuros de cobre enriquecidos, y con menos frecuencia en concentraciones distales conocidos como depósitos exóticos de óxidos.

La roca porosa suprayacente de la que fueron removidos los minerales de cobre hipógenos y otros componentes de la roca se denomina capa lixiviada. En la figura 2,4 se muestran las relaciones espaciales de la capa lixiviada, el mineral de óxido, el mineral de sulfuro y el mineral de óxido exóticos con las litologías y las zonas de alteración hipógena en un típico yacimiento pórfido de cobre andino. Para la identificación del enriquecimiento subyacente se utilizan asociaciones y texturas de minerales presentes de la capa lixiviada, los minerales supérgenos suelen ser los primeros en extraerse debido a su proximidad en la superficie actual, leyes de cobre elevados y altas recuperaciones de cobre.

El espesor de la capa lixiviada es muy variable y varía desde cero a varios cientos de metros en su mayoría. Las zonas de mineral óxido de cobre tienen un espesor de hasta 300 m, pero comúnmente de decenas a menos de 200 m de espesor y consta con una ley de 0.34% a 1% de cobre. Las zonas de mineral de óxido exótico tienen una ley de 0.27% a más de 1% de cobre. Los minerales de sulfuro de cobre enriquecidos tienen hasta 750 m de espesor, pero en su mayoría tienen de decenas a varios cientos de metros con leyes de 0.4% a 1.8% de cobre. Los minerales de sulfuro de cobre enriquecidos son invariablemente de mayor ley que el mineral hipógeno subyacente o la roca mineralizada de cobre, mientras que las leyes de las zonas de mineral de óxidos de cobre son más bajas o altas que las leyes de las fuentes hipógenas. La recuperación de cobre a partir de minerales óxidos de cobre a un costo relativamente bajo mediante la disolución ácida y la precipitación del cobre ha permitido el procesamiento de depósitos de óxidos de baja ley.

La meteorización y el enriquecimiento significativo en estos tipos de yacimientos están controlados por una cantidad de factores; la permeabilidad producto de las fallas, fracturas y venillas de stockwork; la configuración y mineralogía de zonas de alteración hipógena, especialmente pirita/sulfuros de cobre y capacidad amortiguadora de ácidos; las tasas de erosión y oxidación (clima), tectonismo, topografía y tiempo (Sillitoe, R. H., 2005). Las condiciones químicas cambiantes producen asociaciones de minerales de desequilibrio y fases metaestables en relaciones paragenéticas complejas.

La capa lixiviada encierra zonas de minerales de óxidos de cobre, pero la mayoría de las zonas de mineral de óxido de cobre no exóticos se encuentran inmediatamente por

encima de las zonas de enriquecimiento de sulfuros. El mineral de óxido de cobre desarrollado sobre el mineral hipógeno o rocas mineralizadas de cobre con bajas concentraciones de pirita tiende a ser relativamente uniforme y se gradúa lateralmente en un recubrimiento lixiviado sobre halos de pirita (ver figura 2,3). El mineral óxido de cobre en o sobre zonas de sulfuros de cobre enriquecido son generalmente pequeños y discontinuos tanto vertical como lateralmente y confinados a lentes en la base de capa lixiviada. El mineral de sulfuro de cobre enriquecido se desarrolla mejor sobre el mineral hipógeno o las rocas mineralizadas de cobre que contienen aproximadamente 5 veces más pirita que los minerales de sulfuro de cobre. Las leyes de cobre de las zonas de sulfuros de cobre enriquecidos son hasta 3 veces mayores que las del mineral hipógeno subyacente o la roca mineralizada de cobre.

Los minerales comunes en la zona de óxidos incluyen brocantita, cobre pitch, cuprita, cobre nativo, tenorita, crisocola, neotocita, malaquita y atacamita; se han identificado muchos otros minerales de carbonatos, óxidos, silicatos y sulfatos de cobre (ver tabla 2,1). El cobre en los depósitos de óxidos exóticos se encuentra principalmente en crisocola, cobre wad y atacamita (Sillitoe, R. H., 2005). La mineralogía de los óxidos está controlada en gran medida por el pH del fluido, que a su vez está controlado por los minerales de pirita/sulfuros de cobre hipógenos o roca mineralizada de cobre o el mineral supérgeno, y por la capacidad de neutralización de ácidos de las rocas huésped. El cobre en el mineral de sulfuros enriquecidos se encuentra principalmente en la calcosina; el cobre en menor medida se deriva de los minerales covelita y Cu_xS_y . En algunos yacimientos porfiríticos se encuentran minerales mixtos de óxido-sulfuro que contienen combinaciones de óxidos de cobre y minerales de sulfuros.

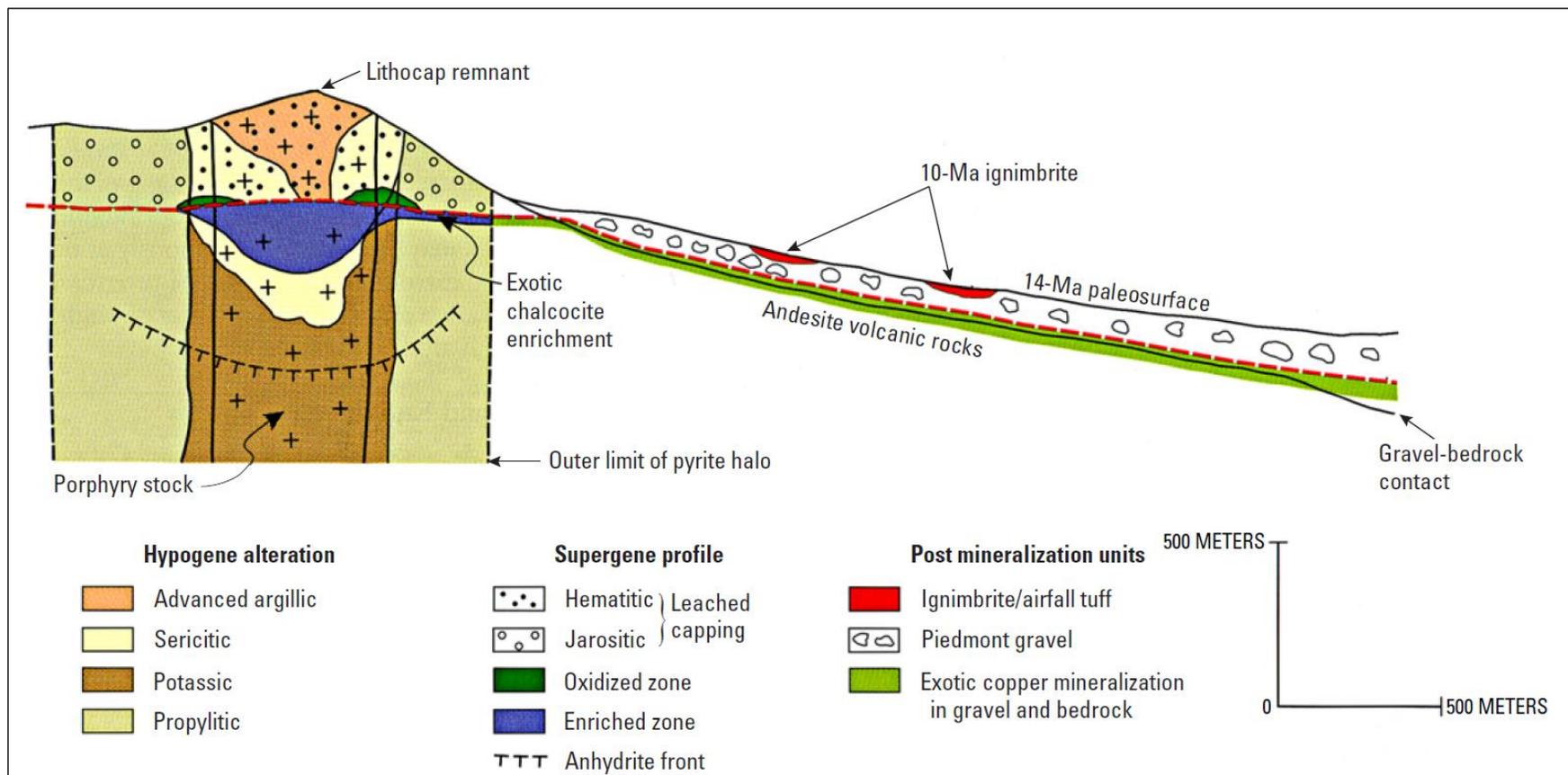


Figura 2,3 Perfil supérgeno maduro basado en depósitos de pórfido de cobre en el norte de Chile (reproducido por Sillitoe, 2005). La posición y configuración de la capa lixiviada y la zona de mineral de sulfuro enriquecido (azul oscuro) están controladas por una alteración sericitica y argilica avanzada. El mineral de óxido de cobre (verde oscuro) se estabiliza mediante un fluido de pH más alto en las zonas de alteración potásica exterior e interior propilítica. La posición y configuración del enriquecimiento de calcosina exótica y la mineralización de óxido de cobre exótico (verde claro) están controladas por el halo de pirita y la tabla de paleo-agua.

*Fuente: Tomado de "Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration", Corbett, G. (2018).

Las texturas y el tamaño de los granos en el mineral de sulfuro enriquecido se asemejan mucho a los del mineral hipógeno sobre el que se ha superpuesto en enriquecimiento. La calcosina supérgena y los minerales de covelita y Cu_xS_y , se presentan en varias formas de texturas que incluyen:

- (1) Reemplazo parcial de pirita en venillas y diseminada, calcopirita y otros minerales de sulfuros de cobre en fracturas internas rellanadas con bordes de calcosina; el reemplazo parcial es característico de las partes inferiores de las zonas de enriquecimiento donde se clasifican en mineral hipógeno o roca mineralizada de cobre; y
- (2) Reemplazamiento completo de pirita en venillas y diseminado por calcosina en zonas maduras y superiores de las zonas de enriquecimiento.

El tamaño y la apariencia de los granos de la calcosina varían desde agregados microcristalinos de color negro como hollín hasta agregados cristalinos de color gris acero de grano fino.

2.1.4 Solubilidad

Garritz, A., Gasque, L. y Martinez, A. (2005) – “Química Universitaria”, explica los fundamentos de la solubilidad, el cual se define como la cantidad máxima de una sustancia que puede disolverse completamente en una cantidad de solvente, representa un concepto fundamental en los campos de investigación de la química y física.

La medición de la solubilidad se define en distintos tipos de unidades, cada una de las cuales representa una expresión de la cantidad de soluto disuelto en una solución a una

determinada temperatura. Las soluciones están saturadas si el solvente ha disuelto la máxima cantidad de soluto permisible a una temperatura específica y no saturadas cuando la concentración del soluto es menor que la concentración saturada. Para muchas sustancias, los valores de solubilidades se encuentran indicados en tablas (ver figura 2,4), lo cual nos ayuda a tener una conceptualización preliminar antes de disolver una determinada sustancia.

Nombre	Fórmula	K_{ps}	pK_s
Cloruro de plata	AgCl	1.6×10^{-10}	9.8
Cloruro de plomo	PbCl ₂	2.4×10^{-4}	3.62
Cloruro de mercurio (II)	Hg ₂ Cl ₂	3.5×10^{-18}	17.46
Bromuro de plata	AgBr	7.7×10^{-13}	12.11
Yoduro de plata	AgI	8.3×10^{-17}	16.08
Yoduro de plomo	PbI ₂	1.4×10^{-8}	7.85
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	4.0×10^{-5}	4.4
Carbonato de calcio	CaCO ₃	8.7×10^{-9}	8.06
Carbonato de bario	BaCO ₃	8.1×10^{-9}	8.09
Carbonato de plomo	PbCO ₃	3.3×10^{-14}	13.48
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) ₂	1.2×10^{-11}	10.92
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	8.0×10^{-6}	5.1
Hidróxido de cobre (II)	Cu(OH) ₂	2.2×10^{-20}	19.66
Hidróxido de hierro (II)	Fe(OH) ₂	1.6×10^{-14}	13.8
Hidróxido de hierro (III)	Fe(OH) ₃	1.1×10^{-36}	35.96
Hidróxido de aluminio	Al(OH) ₃	1.8×10^{-33}	32.74
Sulfuro de cobre (II)	CuS	6.0×10^{-37}	36.22
Sulfuro de hierro (II)	FeS	6.0×10^{-19}	18.22
Sulfuro de plata	Ag ₂ S	6.0×10^{-51}	50.22
Sulfuro de plomo	PbS	3.4×10^{-28}	27.47
Sulfuro de mercurio	HgS	4.0×10^{-54}	53.4

Figura 2,4 Productos de solubilidades de algunas sales a 25°C.

*Fuente: "Química Universitaria", Garritz, A., Gasque, L. y Martínez, A. (2005)

El fenómeno de la solubilidad está fuertemente relacionado con las fuerzas intermoleculares entre soluto-soluto, solvente-solvente y soluto-solvente. Basados en la termodinámica de la solubilidad, se han desarrollado muchos modelos para predecir la solubilidad cuando una medición directa es complicada. Por otro lado, la solubilidad proporciona la forma de estudiar el comportamiento de una determinada sustancia y la interacción con otras sustancias a nivel molecular.

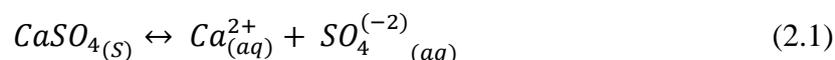
2.1.5 Factores que afectan la solubilidad

Garriz, A., Gasque, L. y Martinez, A. (2005) – “Química Universitaria”, menciona que existen tres factores fundamentales que influyen en la solubilidad de cualquier compuesto, los cuales son:

- **Efecto de ion común**

El efecto de iones comunes es un término que describe la disminución en la solubilidad de un compuesto iónico cuando se agrega a la mezcla en equilibrio otro compuesto que contiene iones.

Ejemplo: Si tenemos el compuesto iónico de sulfato de calcio y se agrega agua, entonces la ecuación iónica de equilibrio es la siguiente:



El sulfato de calcio es ligeramente soluble, en el equilibrio, la mayor parte del calcio y el sulfato existen en forma sólida de sulfato de calcio. Si agregamos a la solución el compuesto iónico de sulfato de cobre ($CuSO_4$), el cual es compuesto soluble, su único efecto importante en la ecuación iónica será la adición de más iones sulfato (SO_4^{2-}).

Los iones sulfato disociados del sulfato de cobre están presentes en la mezcla, esta adición de iones sulfato ejerce presión sobre el equilibrio previamente establecido, entonces la tensión adicional da como resultado el desplazamiento del equilibrio hacia el lado de los reactivos para aliviar esta nueva tensión, por lo tanto, la solubilidad del sulfato de calcio ligeramente soluble se reduce aún más.

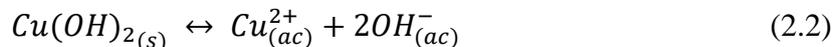
- **La temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la solubilidad de los sólidos difieren dependiendo si la reacción es endotérmica o exotérmica. Para las reacciones endotérmicas, el aumento de la temperatura da como resultado una tensión en el lado de los reactivos debido al calor adicional, entonces el sistema se desplaza hacia el lado de los productos, por lo tanto, se disocia más sólido cuando se establece nuevamente el equilibrio lo que aumenta la solubilidad. Para las reacciones exotérmicas, el aumento de la temperatura da como resultado una tensión en el lado de los productos debido al calor adicional, entonces el sistema se desplaza hacia el lado de los reactivos, por lo tanto, menos sólido se disocia cuando el equilibrio se establece nuevamente lo que resulta una disminución de la solubilidad. En caso de los líquidos, no hay tendencias definidas para los efectos de la temperatura sobre la solubilidad de los líquidos.

- **Efecto del pH**

Los aniones compuestos por una sal poco soluble tienen gran afinidad por el ion hidrógeno (H^+).

Ejemplo: Se presenta la reacción de solubilidad para el $Cu(OH)_2$:



Según la reacción, el ion Cu^{2+} tenderá a precipitar como hidróxido al estar en un medio con abundantes iones OH^- . No obstante, la ley de acción de masas indica que, si se disminuye la concentración de algún elemento o compuesto en los productos, el sistema tenderá a un equilibrio hacia los reactantes, para este ejemplo, si se adiciona

iones H^+ , este buscaría reaccionar con los iones $(OH)^-$ formando agua, lo que ocasiona el aumento de la concentración de $Cu^{+2}_{(ac)}$ en la disolución.

2.2 Marco Conceptual

- Cuña: Conjunto formado por unidades de roca cabalgantes con una forma de un prisma triangular.
- Capa: Unidad estratigráfica de roca o alteración.
- Cúpula: Pequeña intrusión formada a partir de un cuerpo principal de un batolito en forma de un domo.
- Horizonte: Unidades de roca que sirven como referencia para una secuencia estratigráfica.
- Potencia: Medida o distancia entre las dos superficies que delimitan una unidad estratigráfica.
- Suprayacente: Material que se extiende, reposa o está por encima de una superficie (tipo de roca, zonas de alteración o mineralización)
- Subyacente: Material sobre el cual reposa o está por debajo de otra superficie (tipo de roca, zonas de alteración o mineralización).
- Unidad: Conjunto de rocas estratificadas que se relacionan en función de un atributo o características específicas.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 Hipótesis

- El conocimiento de las solubilidades de los minerales económicos que configuran el zonamiento mineralógico en yacimientos tipo pórfido de cobre permitirá mejorar el grado de recuperación.

3.2 Operacionalización de variables

- Variable dependiente (VD): Solubilidades de minerales económicos que configuran el zonamiento mineralógico en pórfidos de cobre.
- Variable independiente (VI): Grado de recuperación del cobre.

Tabla 3,1 Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES
<ul style="list-style-type: none"> • VD: Solubilidades de minerales económicos que configuran el zonamiento mineralógico en pórfidos de cobre. • VI: Grado de recuperación del cobre 	<ul style="list-style-type: none"> • Grado (porcentaje) de las solubilidades de minerales de cobre. • Grado (porcentaje) de recuperación de cobre. • Tamaño de partícula. • Temperatura de muestras analizadas.

**Fuente: Elaboración propia*

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipos y Diseño de Investigación

4.1.1 Enfoque

Desde el punto de vista de enfoque el tipo de la investigación es cuantitativo, puesto que el presente trabajo está orientado al zonamiento de la mineralización en base a datos numéricos de solubilidades de minerales de cobre, los cuales se obtuvieron a partir de datos experimentales realizados en laboratorio. Con estos datos recolectados se realizaron análisis estadísticos de las solubilidades, lo que permitió la formulación de valores y parámetros que zonifiquen distintas áreas con mineralización de cobre que compartan características y comportamientos similares.

4.1.2 Alcance

Desde el punto de vista de alcance el tipo de la investigación es correlacional, dado que se realiza analogías estadísticas entre valores de solubilidades en ácido

sulfúrico y cianuro de sodio, obtenidos a partir del análisis de cobre secuencial a una misma muestra de roca. Asimismo, se realizó correlaciones entre los valores de solubilidades y el tipo de mineralización, con el propósito de determinar un zonamiento de un yacimiento tipo pórfido de cobre a partir de estos datos.

4.1.3 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación es experimental, debido a que se realizó pruebas y análisis de solubilidades en laboratorio a muestra de rocas seleccionadas. Para este trabajo se utilizaron dos variables principales, las cuales corresponden a la solubilidad en ácido sulfúrico y solubilidad en cianuro de sodio, ambos datos fueron obtenidos de forma experimental y analizados a partir de los procesos hidrotermales que dieron origen a la formación de las alteraciones y mineralización de cobre.

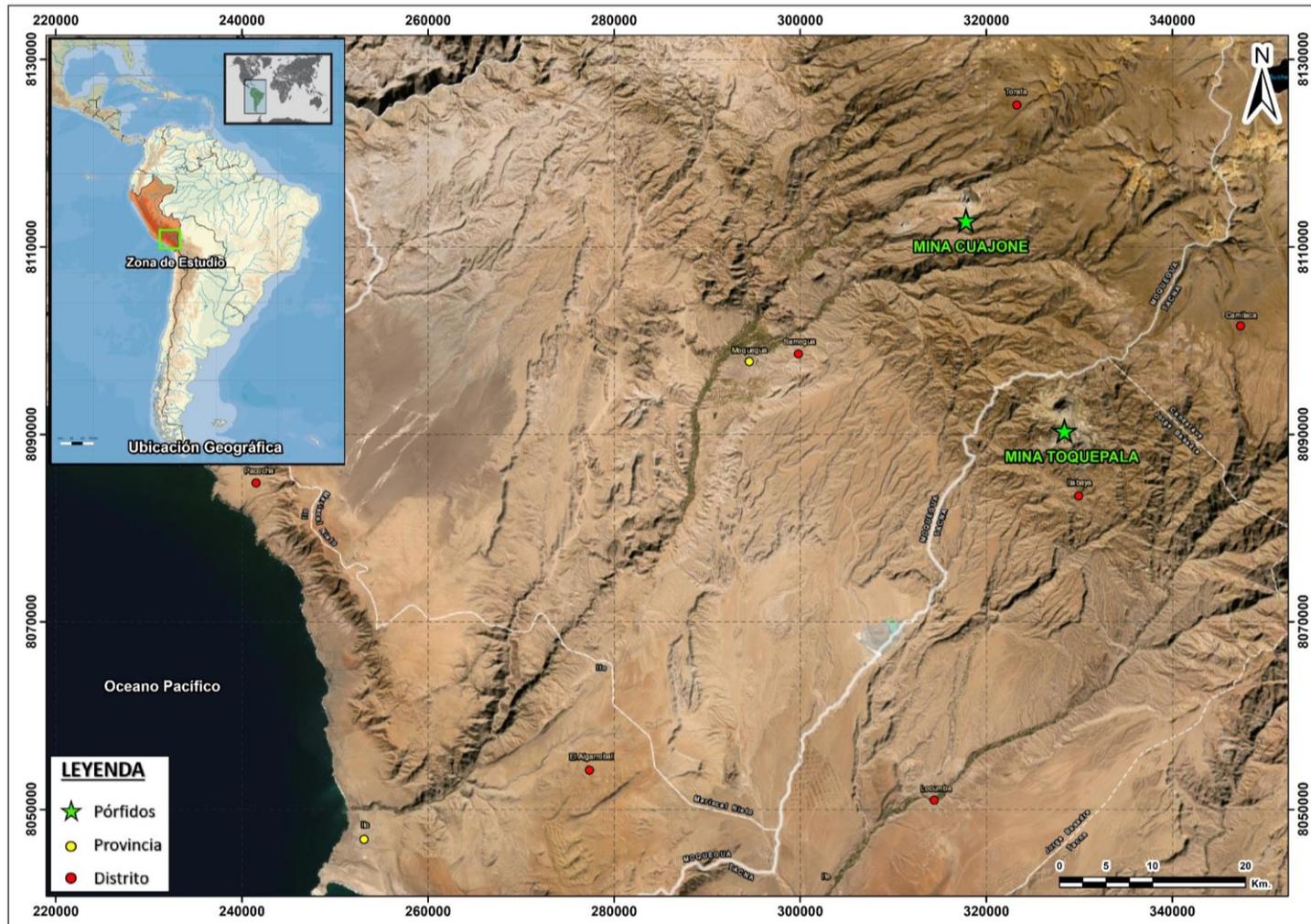
4.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis se centra en el estudio de los yacimientos tipo pórfido de cobre relacionados con la metalogenia del Sur del Perú, de los cuales se tomará como referencia a los proyectos mineros Cuajone y Toquepala (ver figuras 4,1 y 4,2).

El proyecto Cuajone, propiedad de Southern Peru Copper Corporation, se ubica al Sur del Perú en el flanco Andino de la Cordillera Occidental de los Andes, distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto y departamento de Moquegua, a una distancia de 42 km al Noreste de la ciudad de Moquegua y una elevación de 3150 a 3500 m.s.n.m.

Es un yacimiento tipo pórfido de cobre-molibdeno emplazado en un sector con accidentada topografía ocupando la ladera Sur de la Quebrada Torata y cortada hacia el centro por la Quebrada Chuntalaca, la mineralización de cobre se localiza en una

roca con fuerte fracturamiento producto de múltiples intrusiones. El basamento es constituido por una secuencia de derrames volcánicos de andesitas y riolitas, sometidos por una fuerte actividad ígnea intrusiva con edad entre 57.0 Ma y 52.15 Ma (Simmons, Adam, 2013; Concha, D. y Valle, J., 1999), perteneciente a edad Paleoceno – Eoceno que constituye el Grupo Toquepala.



*Figura 4,1 Ubicación Geográfica de los proyectos mineros Cuajone y Toquepala – Datum WGS 1984, Zona 19S
 Fuente: Elaboración propia, Google Earth (2021)

El proyecto minero Toquepala, propiedad de Southern Peru Copper Corporation, se encuentra ubicado al Sur del Perú en el límite de los departamentos de Moquegua y Tacna, pertenece al distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna, aproximadamente a 30 km al Sureste de Cuajone (ver figuras 4,1 y 4,2) y una elevación entre 3100 a 3600 m.s.n.m.

Es un yacimiento tipo pórfido de cobre-molibdeno, donde la mineralización se encuentra asociada a una chimenea de brecha y una intrusión de composición dacítica, ambos vinculados geológicamente a una actividad hidrotermal calco-alcalina, las edades de los intrusivos datan entre 57.1 \pm 0.57 Ma a 54.5 \pm 1.5 Ma (Simmons, 2013; Mattos, R. y Valle, J., 1999) pertenecientes a edad Paleoceno – Eoceno.

4.3 Matriz de consistencia

Tabla 4,1 Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE	
¿En qué grado influye un incorrecto zonamiento de la mineralización en un yacimiento tipo pórfido a partir del análisis de cobre secuencial ligado al grado de recuperación?	Establecer un zonamiento geológico eficaz de la mineralización en un yacimiento tipo pórfido de cobre a partir del estudio de las solubilidades de los minerales económicos con la finalidad de mejorar el grado de recuperación.	El conocimiento de las solubilidades de los minerales económicos que configuran el zonamiento mineralógico en un yacimiento tipo pórfido de cobre permitirá mejorar el grado de recuperación.	Solubilidades de minerales económicos que configuran el zonamiento mineralógico de pórfidos de cobre.	Mejorar el grado de recuperación del cobre.	Grado (porcentaje) de las solubilidades de minerales de cobre. Grado (porcentaje) de recuperación de cobre. Tamaño de partícula. Temperatura de muestras analizadas.

*Fuente: Elaboración propia

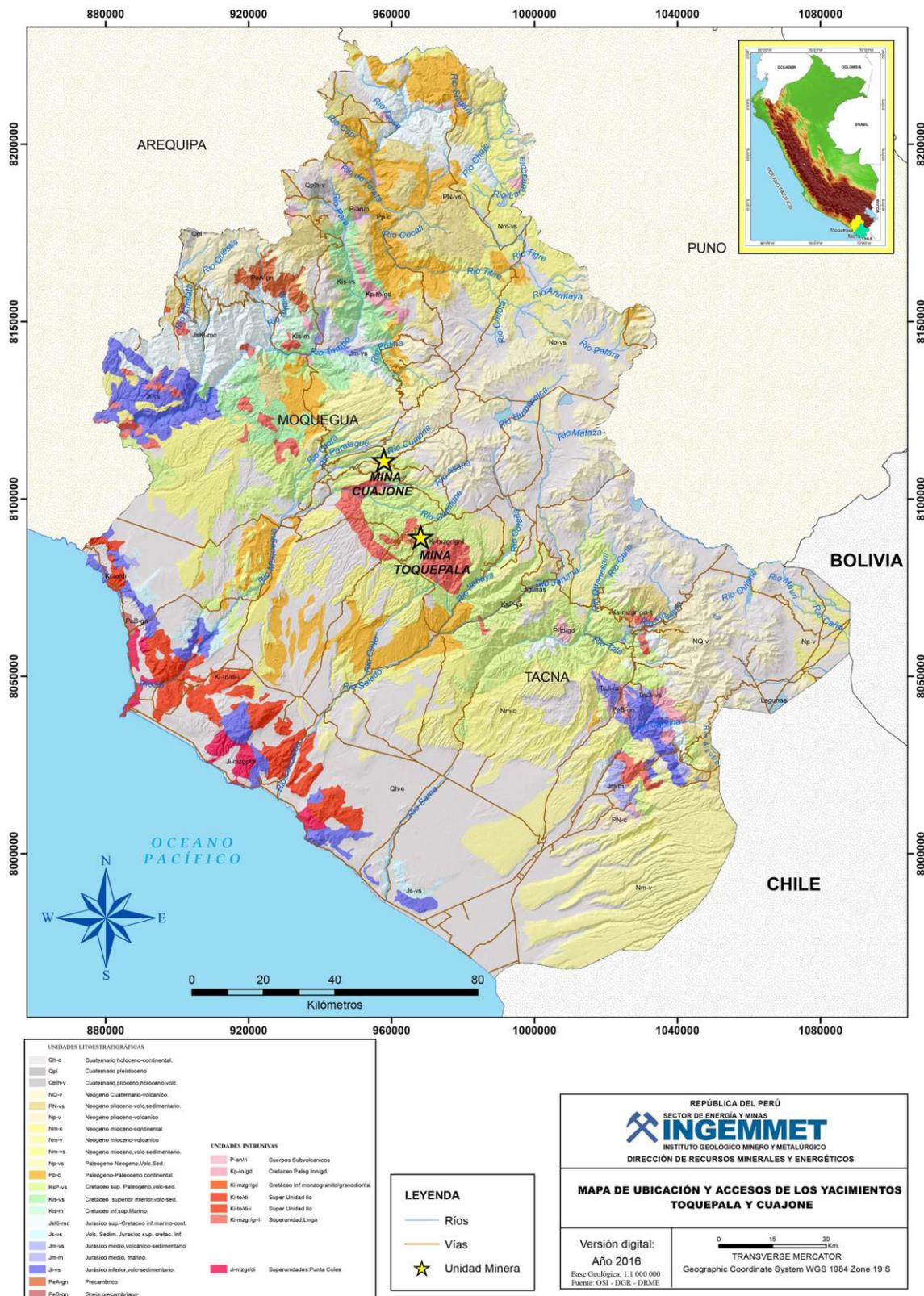


Figura 4,2 Ubicación de los proyectos mineros Cujajone y Toquepala.
 *Fuente: “Caracterización Petromineralógica de los Yacimientos Toquepala y Cujajone”,
 Gagliuffi, P. y Vera, M. (2018)

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

5.1 Recolección de Datos

Se recolectó información bibliográfica de los yacimientos tipo pórfido de cobre ubicados al sur del Perú, así como las características principales que determinan su estratigrafía, magmatismo, control estructural y procesos hidrotermales en base a investigaciones y trabajos previos.

Adicional a ello, se tomó muestras de campo representativas de distintas zonas en base a unidades de alteración y mineralización como se muestra en las tablas 5,1, 5,2, 5,3 y 5,4, las cuales fueron el objeto de estudio de la investigación.

5.2 Procesamiento de la Información

En esta etapa se realizó una síntesis de toda la información bibliográfica referente a los yacimientos tipo pórfido de cobre ubicados en el sur del Perú, con lo

cual se detalló mediante resúmenes, esquemas y cuadros, todas las características desde la génesis, formación y mineralización para este tipo de depósito.

Por otro lado, las muestras representativas obtenidas de campo (ver anexos 1 y 2) fueron llevadas al Laboratorio de Geoquímica de la Escuela de Geología de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se realizaron análisis de cobre secuencial mediante la solubilización por ácido sulfúrico y cianuro de sodio tal y como se explica en el punto 5.3.6.1.

Tabla 5,1 Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Transicional.

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	LITOLOGÍA
ST-1	98079.43	35749.95	3026.25	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Macropòrfido Dacítico
ST-2	99510.04	34547.00	3064.53	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-3	99212.45	35202.52	3046.45	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Diorita
ST-4	101973.65	34000.86	2964.17	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-5	102048.23	34153.25	2987.64	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-6	97496.00	36339.50	2977.35	Chloritic Potassic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-7	96935.90	35750.00	2973.35	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-8	98689.73	35099.68	3104.38	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-9	98499.62	35002.22	3081.54	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-10	99299.47	35009.16	3019.16	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P2
ST-11	98299.75	35798.87	3069.16	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-12	99400.05	34799.50	2963.66	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-13	98901.46	35346.52	2961.86	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-14	102153.28	33950.26	2959.85	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-15	102123.05	33989.77	3028.98	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-16	102086.70	34102.39	3041.89	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-17	102086.70	34102.39	3026.31	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-18	97749.92	36095.56	3025.09	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-19	97201.52	35650.37	3047.73	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P2
ST-20	97750.02	35375.23	3107.84	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-21	97320.52	35801.48	3078.66	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-22	97200.64	35599.26	2912.72	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P2
ST-23	96615.00	35900.00	3078.66	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-24	97403.30	35692.18	3169.95	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-25	99200.23	35053.06	3017.28	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-26	98949.14	35102.45	3006.35	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-27	99350.00	35347.00	2995.71	Phyllic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-28	101971.95	34173.80	3020.45	Phyllic	Sulfuros Transicional	Dacita Porfirita
ST-29	97850.66	35749.93	3020.37	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-30	97748.39	35800.81	3029.44	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-31	97175.35	35800.36	3048.78	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-32	97500.06	35849.29	2986.92	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P3
ST-33	97498.92	36203.31	3064.09	Phyllic	Sulfuros Transicional	Pòrfido Monzonita P1
ST-34	99299.99	35427.00	3107.86	Intermediate Argillic	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-35	98300.01	35299.94	3083.12	Phyllic	Sulfuros Transicional	Granodiorita

* Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Geología regional

En el presente trabajo de investigación se detalla la geología regional de los yacimientos porfiríticos ubicados en el sur del Perú, cuyas Formaciones y Grupos de rocas abarcan edades desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. Los pulsos magmáticos intrusivos que dieron origen a los sistemas porfiríticos abarcan edades entre el Jurásico y el Mioceno.

Tabla 5,2 Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Primarios.

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	LITOLOGÍA
SP-1	99304.00	34500.00	3081.35	Biotite Potassic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-2	99049.99	34849.98	2957.55	Biotite Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-3	97399.76	35849.93	2882.67	Biotite Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-4	97689.07	36100.00	3145.25	Biotite Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-5	97699.86	36149.91	2882.47	Biotite Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-6	99000.75	35401.00	3075.46	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-7	98794.98	35599.95	3040.44	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-8	96904.10	36002.85	3240.71	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-9	97599.16	36001.30	3032.80	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-10	97300.50	36198.18	3191.90	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-11	98898.43	35102.31	3077.44	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-12	98999.66	35100.93	3060.76	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-13	99200.00	35149.88	2959.12	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Diorita
SP-14	99304.40	35203.75	3034.10	Chloritic Potassic	Sulfuros Primarios	Diorita
SP-15	99200.59	34951.14	2964.48	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-16	98952.00	35151.00	2867.68	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-17	98549.98	35203.04	3088.92	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-18	97950.30	35549.17	3108.60	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-19	98955.00	35200.00	2868.09	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-20	97099.80	35850.00	2912.87	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-21	97981.60	35929.91	2795.00	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-22	97599.98	35900.00	2747.99	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-23	97249.84	35999.95	2868.16	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-24	97649.99	36300.14	3002.80	Feldspathic Potassic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-25	99099.75	34600.87	3077.53	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-26	99199.83	34700.03	2988.53	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-27	99095.94	35200.83	3052.57	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-28	98620.10	35500.00	3066.96	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-29	97400.00	35749.98	2883.04	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-30	96949.69	35900.16	2928.03	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-31	98235.97	35949.89	3052.50	Intermediate Argillic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-32	98777.52	35176.00	3106.79	Partial Potassic	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-33	98800.01	35150.01	2747.55	Partial Potassic	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-34	98950.03	35250.01	2974.98	Partial Potassic	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-35	97800.10	35849.77	2867.65	Partial Potassic	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-36	99299.87	34800.93	3059.47	Phyllic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-37	99099.84	35099.52	3018.34	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-38	99248.92	35099.59	2958.06	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-39	98650.03	35599.98	3048.83	Phyllic	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-40	97549.90	35699.92	3002.71	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-41	96921.06	35881.20	3228.39	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-42	97004.59	36046.79	3013.04	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-43	96950.70	36097.00	3214.80	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-44	97399.50	35800.40	3077.57	Phyllic	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3

* Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5,3 Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Óxidos de cobre.

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINRALIZACIÓN	LITOLOGÍA
OX-1	102214.39	33699.78	3103.22	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-2	101991.62	33900.50	3128.90	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-3	102042.63	34302.69	3100.75	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-4	101853.10	34300.82	3155.58	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-5	102147.40	33842.44	3127.92	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-6	97900.11	36100.06	3033.25	Argílica	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-7	102124.49	34304.73	3248.59	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-8	102347.57	33392.67	3200.35	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-9	101978.10	33925.27	3193.51	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-10	102048.23	34153.25	2971.51	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-11	102090.64	34568.63	3125.95	Argílica	Óxidos	Dacita Porfirita
OX-12	102086.70	34102.39	3189.14	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-13	102044.99	34225.02	2978.39	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-14	97696.10	36306.90	3035.44	Argílica	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-15	102549.04	33458.26	3047.35	Argílica	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-16	97597.75	36097.93	3064.62	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-17	97749.65	35899.87	3053.51	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-18	97698.75	35800.18	3029.90	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-19	97549.73	35850.43	3014.76	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P3
OX-20	97542.00	36106.00	3095.73	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-21	100100.00	34749.99	3112.39	Argílico/Filico	Óxidos	Granodiorita
OX-22	98163.02	35908.78	3016.78	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P1
OX-23	97450.15	36050.12	3094.98	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P3
OX-24	97500.37	36098.43	3110.46	Argílico/Filico	Óxidos	Pòrfido Monzonita P3

* Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5,4 Muestreo de rocas correspondientes a la mineralización de Sulfuros Secundarios.

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINRALIZACIÓN	LITOLOGÍA
SS-1	99251.01	34400.00	3077.53	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-2	99200.02	35334.99	3060.46	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-3	98959.02	35549.91	3039.44	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-4	98242.21	35750.10	3082.99	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-5	98305.51	35950.02	3053.97	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-6	96850.00	35401.00	3068.65	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-7	99079.96	35399.99	3020.21	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P2
SS-8	97999.98	35549.92	3047.96	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-9	98599.99	35549.98	3055.36	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-10	96950.11	35600.00	2972.42	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-11	98049.90	35597.90	3106.45	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-12	98199.69	35599.97	3106.56	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-13	98249.63	35598.69	3096.70	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-14	98092.90	35657.86	3101.72	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-15	98097.94	35651.07	3091.97	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-16	98300.63	35701.66	3070.77	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-17	96950.01	35800.00	2903.17	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P2
SS-18	97982.23	35909.96	2797.85	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-19	96549.98	35950.00	3093.46	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-20	98235.97	35949.89	3052.50	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-21	97097.38	36000.26	3228.70	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-22	96940.07	36201.20	3186.44	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P1
SS-23	96909.78	36244.16	3186.56	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-24	97034.94	36299.99	2944.24	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-25	98182.45	35312.63	3084.63	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-26	99299.98	35301.03	3062.45	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-27	99399.98	35246.43	3047.80	Intermediate Argillic	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-28	99399.77	34901.00	3071.59	Phyllic	Sulfuros Secundarios	Pòrfido Monzonita P2

* Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5,1 se muestra la ubicación de la zona sur del Perú. Los rasgos orográficos y estructurales muestran una orientación preferencial NO-SE con unidades sedimentarias e ígneas que abarcan desde el Meso-Proterozoico hasta el Cuaternario. Sus características estratigráficas muestran unidades marinas y continentales con

presencia de rocas volcánicas e intrusivas que se desarrollaron desde el Ordovícico-Jurásico hasta el Holoceno, y que éstas fueron emplazadas en un basamento antiguo y rígido (Complejo Basal de la Costa).

5.2.1.1 Estratigrafía

Se clasificarán las rocas existentes en base a sus edades y tiempo geológico (ver figura 5,2).

- Precámbrico – Paleozoico

Corresponden principalmente a rocas que forman el Complejo Basal de la Costa, entre los cuales se encuentran gneis, migmatitas, esquistos, anfibolitas y cuarcitas, así mismo, se identifican diques pegmatíticos compuesto por ortosa, biotita, cuarzo y moscovita. Desde Chala a Ocoña se reconoce ortogneis de composición diorítica, desde Camaná a Mollendo rocas de composición granítica con cuarzo, plagioclasa, epidota, clorita, sericita y calcita (Marchena, A., 2019).

El Complejo Basal de la Costa fue sometido a un proceso metamórfico regional con presión intermedia y altas temperaturas, los procesos tectónicos que lo afectaron fueron las fases orogénicas con edades pre-cambrianas, paleozoicas (Hercínica) y cenozoicas. De acuerdo con las dataciones radiométricas en K/Ar en gneis del macizo de Arequipa, se establece edad Precámbrica para el complejo basal (Bellido, E. y Narvaez, S., 1960).

Se determinaron unidades lito-estratigráficas de edades:

A. Ordovícico: reconocidas a partir de fósiles Graptolites en la zona del Altiplano, al oeste de la ciudad de Ayaviri (Puno), así mismo, se reconoce el batolito de Mejía, cartografiado en la zona de Punta de Bombón – Arequipa.

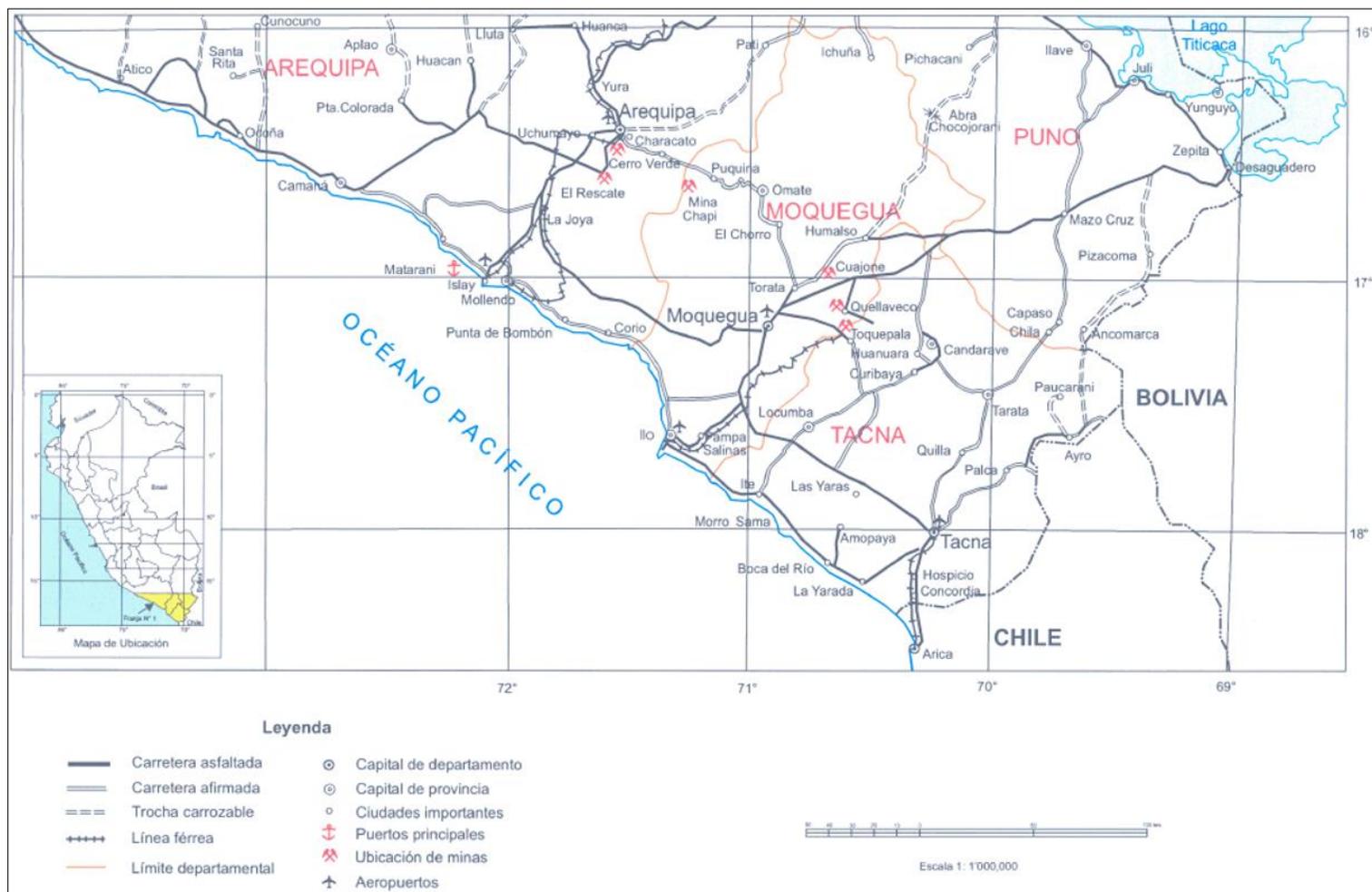


Figura 5,1 Mapa de ubicación y acceso de la zona sur del Perú.

*Fuente: “Rocas Ígneas en el sur del Perú. Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30’ Latitud Sur”, Martínez, William y Cervantes, John (2003)

B. Devónico: Grupo Cabanillas – reconocidas en el valle del río Tambo, en la carretera Tacna-Tarata y en el valle del río Majes (Formación Torán), principalmente en base a fósiles (braquiópodos) y lito-estratigrafías similares.

Carbonífero: Grupo Ambo – identificado en la carretera Tacna – Palca, basándose en plantas fósiles hallados en la zona del Mal Paso. (Pino, A., *et al.*, 2002).

- **Mesozoico**

Se reconoce en muchos sectores al Grupo Yura, Formación Guaneros y Grupo Toquepala, así mismo, se reconoce la Formación Chocolate en base a fósiles y lito-estratigrafía similares en afloramientos de la Faja Costanera. Se estableció la presencia de calizas del Jurásico Inferior en las quebradas de Capilla, y Chapi en los valles de los ríos Tambo y Majes. La Formación Matalaque de edad Cretácico Inferior, fue recocida en los sectores de Moquegua-Tarata y Palca.

Formación Chocolate

Rocas del periodo Jurásico. Distribuido en el margen costero de la Cordillera Occidental, el nombre es dado por la cantera Chocolate que se encuentra a 20 km al Noroeste de la ciudad de Arequipa (Jenks, William, 1948).

Aflora principalmente en la Cordillera de la Costa, dividida en dos zonas; hacia la parte inferior constituida por rocas volcánicas, principalmente brechas, derrames y tobas, las mismas que hacia la base están sometidas a un leve metamorfismo con marcada esquistosidad y; hacia la parte superior constituidos por intercalaciones de derrames volcánicos y estructuras sedimentarias.

En la quebrada de Esbilla – Arequipa, se reconocen limonitas calcáreas y a medida que se avanza hacia el Este se muestran más compactas y sin presencia de carbonatos,

se reconocen facies bien marcadas donde las limonitas grises gradan a areniscas y cuarcitas bandeadas entre colores blanco y marrón. En la zona de Tipán y Pampacolca, se han evidenciado areniscas de grano medio a grueso de tonalidad blanquecinas y estratificación cruzada, intercaladas con limonitas con presencia de restos fósiles de plantas; el Grupo Yura infrayace en concordancia con areniscas de la Formación Murco y en contacto fallado a la Formación Socosani. Por las características y restos fósiles, se asume la génesis de esta formación en ambiente marino somero.

Formación Matalaque

Se encuentra aflorando hacia el norte de Ilabaya, suprayace al Grupo Yura e infrayace a tobas soldadas de la Formación Paralaque, se encuentra intrudida por dioritas de la Superunidad Yarabamba. Litológicamente está constituida por rocas volcánicas de composición andesítica-basáltica con textura afanítica de color gris oscuro con moderada estratificación, se encuentra afectada por el sistema de fallas Incapuquio. En promedio se ha evidenciado una potencia de 250 m, dataciones radiométricas cerca de Qunistaquillas muestran una edad de 75 Ma correspondiendo al periodo Cretácico Superior (Sanchez, F. y Agapito, W., 2002).

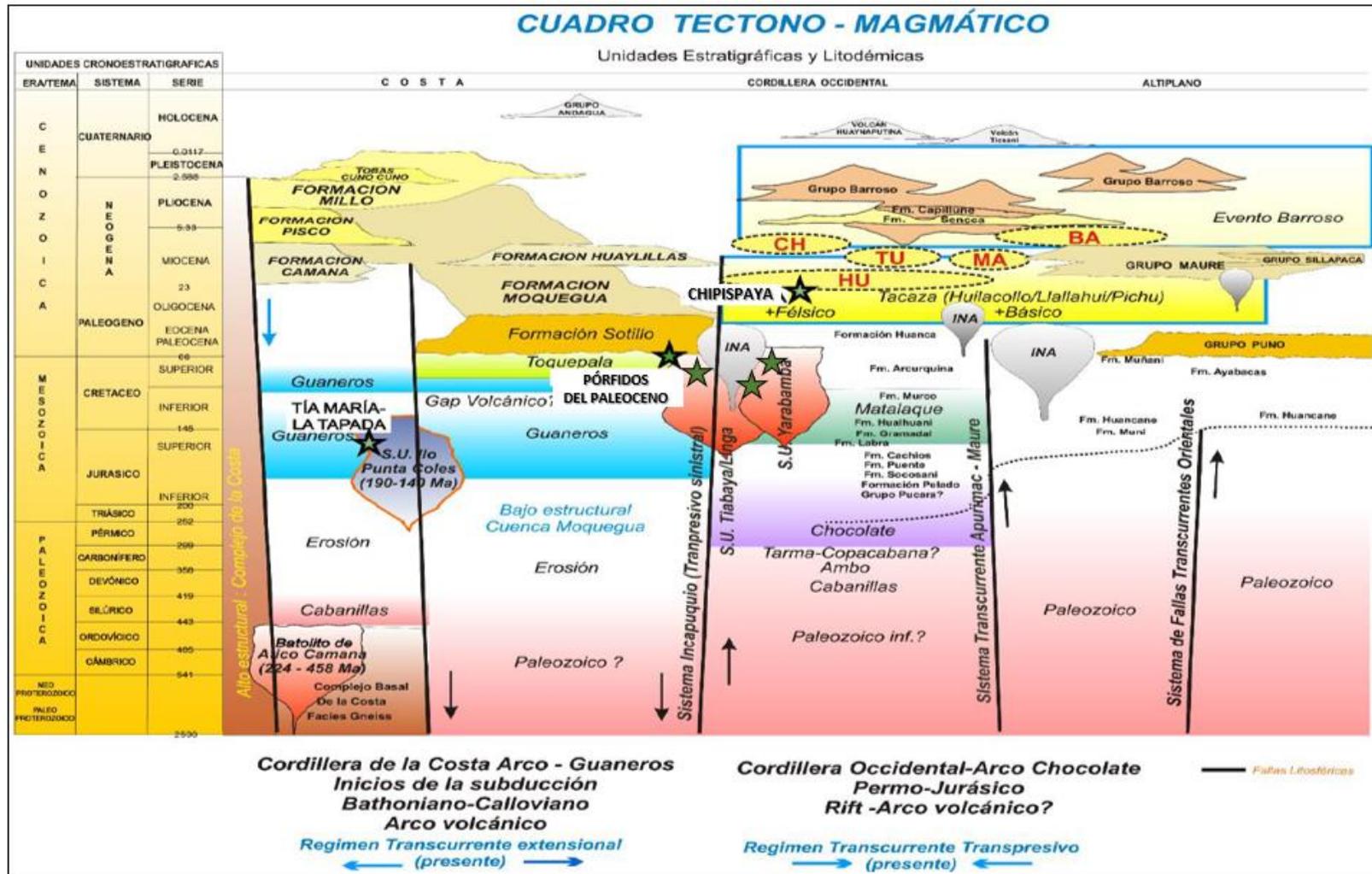


Figura 5,2 Cuadro Tectono-Magmático del Sur de Perú
*Fuente: Tomado y modificado de Martínez, W. y Cervantes, J. (2003)

Grupo Toquepala

Compuesto principalmente por diversos materiales volcánicos con intercalaciones de rocas clásticas aflorando en el Flanco Andino. Petrográficamente muestra una alta diferenciación entre andesitas, dacitas y riolitas sub-alcálicas con alto contenido de sílice, también se encuentran brechas de flujo y material piroclástico de composiciones andesíticas, dacíticas y riolíticas. Niveles sedimentarios muestran conglomerados y areniscas de grano grueso de coloración gris verdoso a pardo claro (Bellido, E. y Narváez, S., 1960). Para este grupo se diferenciaron las Formaciones Huaracané (rocas volcanoclásticas), Inogoya (sedimentitas compuesta por conglomerados, areniscas y gravas), Paralaque (tobas altamente soldadas y porfiríticas) y Quellaveco (rocas volcánicas de composición riolítica), representados por las Unidades Asana (Lavas de composición riolítica con textura porfirítica), Carpanito (lavas de grano fino), Samanape (lavas de composición andesítica y tobas-lapilli estratificadas), Yarito (lavas porfiríticas) y Tinajones (lavas porfiríticas y estratificadas), este último considerado actualmente como equivalente de la Unidad Asana (Martínez W. y Zuloaga A., 2000). Dataciones indican edad Cretácica.

- Cenozoico

Se diferencia variaciones laterales y verticales de las unidades lito-estratigráficas, entre ellos al Grupo Tacaza y Barroso y las formaciones Maure y Capillune. Parte de grupo Toquepala superior (Formación Samanape) aún ha sido incluida dentro de este grupo. Las facies continentales del Oligoceno-Mioceno conocidas como Formación Sotillo, se evidencian mediante relaciones lito-estratigráficas en Arequipa y hacia el lado sur (Omate-Moquegua-Pachia-La Clemesí).

Se establece como Formación Moquegua a las facies de areniscas y conglomerados continentales relacionados a una actividad tectónica del sistema de fallas Incapuquio. El Grupo Barroso se identifica como estructuras individuales por sus características morfoestructurales.

Formación Sotillo

Rocas volcanoclásticas del periodo Paleógeno, areniscas y arcosas de colores grises con tonalidades rojizas (Jenks, William, 1948), encontrándose en disconformidad con rocas volcánicas del Jurásico e intrusivos de edad Cretácico, presenta una estratificación sub-horizontal y paralela con predominio de lodolitas hacia los niveles superiores. Presenta contacto en discordancia con la Formación Moquegua por una capa de yeso de 15 a 20 cm de espesor. Estas facies se encuentran ubicados al Suroeste de Torata – San Miguel con una potencia aproximada entre 150 a 500 m.

Formación Moquegua

Ubicada en la costa meridional en las regiones de Tacna, Arequipa y Moquegua, entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Occidental. Corresponde a una cuenca lacustre conformada por sedimentitas. Hacia el parte inferior constituido por conglomerados polimícticos con clastos de guijas (de composición andesítica, riolítica y diorítica), areniscas gruesas moderadamente estratificados, limolitas y arcillas y; hacia la parte superior conformada por una secuencia discordante de depósitos aluviales de granulometría gruesa, calizas, evaporita y volcánicos tobáceos. Dataciones en tobas muestran edades de 25.3 +/- 0.8 Ma (Cerro Baúl), 22.7 +/- 0.8 Ma

en biotitas (Cerro Blanco) y 23.25 ± 0.8 Ma muestran edades del Paleógeno – Neógeno (Cerro Purgatorio) (Tosdal, R., *et al.*, 1981).

Formación Huaylillas

Conformado por piroclastos de Tobas-lapilli (Wilson, J. y García, W., 1962) de composición riolítica a dacítica de tonalidades grises, blancas y rosadas, con presencia de feldespatos fragmentados, granos de cuarzo, vidrio volcánico y biotitas englobados en una matriz fina de lito-clastos de andesita y basalto, ubicados en la vertiente pacífica de la Cordillera Occidental (Regiones de Tacna y Moquegua).

En las Regiones de Tacna y Moquegua, suprayaciendo en discordancia angular al Grupo Tacaza. Dataciones en K/Ar muestran edades de; 22.8 ± 0.7 Ma (Tala – Coscori), 17.6 ± 0.6 Ma (Cerro Piedra Labrada) y 18.4 ± 0.6 Ma (Tala) – Correspondiendo a edad Mioceno (Tosdal, R., *et al.*, 1981), en Nazca se han datado edades entre los 22 y 18 Ma (Noble, D., Farrar, E. y Cobbing. E., 1979a). Hacia la parte Oriental con una potencia aproximada de 100 m y hacia la zona Occidental de 350 m.

Grupo Tacaza

Conformando principalmente secuencias volcánico-sedimentarias, derrames lávicos, brechas de flujo, tobas y aglomerados, principalmente de composición andesítica-dacítica y en menor proporción riolítica. Espacialmente se encuentra en el flanco oeste de la Cordillera Occidental suprayaciendo en discordancia a la Formación Sotillo y con digitaciones a la Formación Moquegua en la parte Occidental.

Localmente consiste en flujos basálticos. Presenta intercalaciones lenticulares de areniscas lutáceas, conglomerados y tobas redepositadas. El Grupo Tacaza está identificado como un metalotecto, hospedando mineralización polimetálica y auro-argentífera. Dataciones muestran edades aproximadas entre 18 y 40 Ma, correspondiendo al Eoceno Superior y Mioceno Inferior.

Formación Huilacollo

Conforma lavas andesíticas porfiríticas que han sido reconocidas en las hojas de Tarata y Palca. Reconocida como un alto estructural delimitado por rocas piroclásticas y eventos lávicos del Grupo Barroso. Dataciones muestran una edad de 21.3 Ma correspondiendo a edad del Mioceno Inferior.

Formación Sencca

Constituido por una secuencia piroclástica de tobas de composición riolítico a riodacítica (Tosdal, R., *et al.*, 1981), no excede a los 100 metros de potencia y se encuentra suprayaciendo en discordancia angular a los depósitos lacustres de la Formación Maure y/o vulcanitas del Grupo Tacaza. Posee una extensión geográfica considerable utilizado como un horizonte guía para el cartografiado de unidades geológicas del Cenozoico en la Cordillera Occidental del Sur del Perú. Dataciones en K/Ar muestran edades de 6.5 +/- 0.3 Ma en la zona de Cerro Huailao (Moquegua), correspondiendo a edad del Mioceno.

Formación Capillune

Representado por una secuencia lacustrina con niveles de areniscas, conglomerados basales, limonitas, brechas y tobas retrabajadas (Mendivil, 1965). Se identificó en el Altiplano, extendiéndose hasta su margen occidental. Dataciones en

K/Ar muestran edades de 7.0 +/- 0.4Ma (Tosdal, R., *et al.*, 1981) y dataciones en plagioclasas/roca total muestran edades de 3.3 +/- 0.1 Ma (Mendívil, S., 1965), correspondiendo a edad Plioceno. La potencia varía desde los 195 m a pocos metros.

Formación Millo

Secuencia volcánica de composición riolítica, constituido por conglomerados (clasto-soportado levemente inconsolidados con presencia de fragmentos polimícticos sub-angulosos, potencias variables entre 10 a 100 m) e intercalado con niveles de tobas con cristales de plagioclasas y lapilli (Vargas, L., 1970). Dataciones en K/Ar muestran edades desde 8.9 a 12-5 +/- 0.6 Ma (Tosdal, R., *et al.*, 1981), correspondiendo a edad Plioceno – Pleistoceno. La potencia en promedio de esta formación es de 50 m.

Grupo Barroso

Constituido de por una secuencia de conos volcánicos de rocas de composiciones andesítica, latitas y traquitas, ubicados en la cordillera de Barroso con potencias que sobrepasan los 800 metros. La geomorfología de los conos volcánicos más antiguos se encuentra completamente erosionados, sin embargo, el Arco de Barroso (Arco Pichu Pichu, Chachani, etc.) fue erosionado en menor proporción y sometido principalmente a una erosión glaciaria. Volcanes recientes poseen un cierto alineamiento en un eje NO-SE a lo largo de 500 km de longitud (Audebaud, E., *et al.*, 1973), algunos cuerpos volcánicos aún conservan su morfología intacta con cráteres enormes; volcanes con diámetros mayores a 1 km como lo son el Misti, Ubinas, Tutupaca y; diámetros menores como lo son el Yucamane, Condorpico, Chila. El Grupo Barroso es considerado un metalotecto de interés por haberse encontrado

yacimientos de tipo epitermal auro-argentíferos. Dataciones radiométricas indican edad de 5.1 +/- 0.2 Ma, correspondiendo edad Plioceno.

Depósitos Cuaternarios

Corresponden esencialmente a depósitos de origen volcánico asociadas a la Cordillera Barroso que fueron depositadas después de la última glaciación. En menor proporción y distribuidos por todo el territorio sur del Perú, también se han identificado depósitos morreicos de naturaleza volcánica y, depósitos fluvio-aluviales compuesto por gravas y arenas soportados en una matriz areno-limoso asociado a flujos de barro y conos aluviales.

5.2.1.2 Rocas intrusivas

Los eventos plutónicos fueron estudiados y diferenciados en 6 superunidades: Punta Coles, Ilo, Linga, Tiabaya, Yarabamba y Challaviento, los cuales, los 5 últimos forman parte del Batolito de la Costa (Pitcher, W., *et al.*, 1985). A partir de investigaciones relacionadas con metamorfismo, vulcanismo y su evolución andina (Aguirre, L., *et al.*, 1989), se plantea que el Batolito Costero se formó a partir de una cuenca vulcano-metamórfica (termalismo), extensión, subsidencia y fracturamiento. Este Batolito está compuesto principalmente por tonalitas y granodioritas formados a partir de la fusión de gabros parentales más tempranos (Cobbing, E. y Pitcher, W., 1983) (ver figura 5,3).

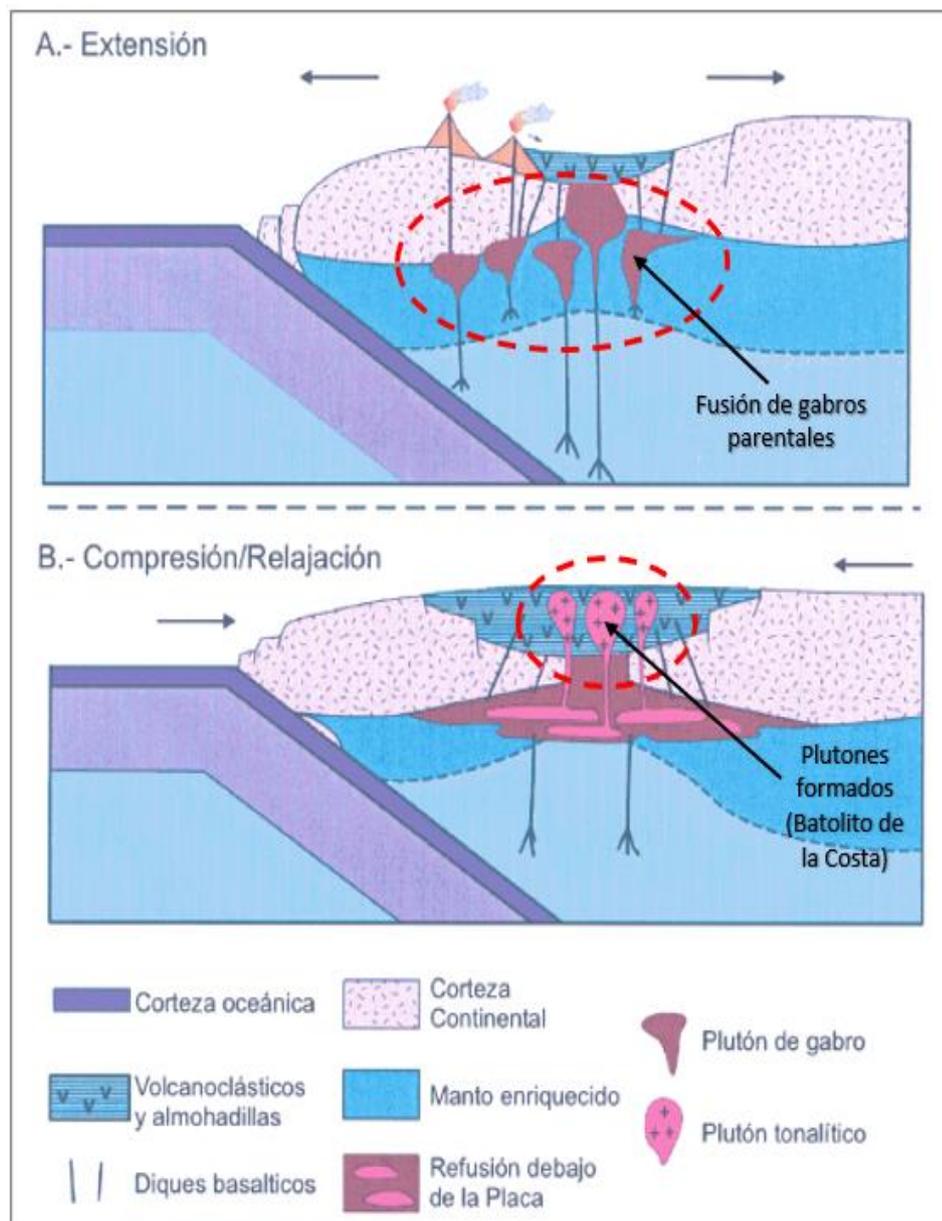


Figura 5,3 Para el Batolito Costero de composición granodiorítica y tonalítica, su origen está basado en la fusión de los gabros parentales (Unidades tempranas de Patap y Pisco) por efecto de la interacción de la gradiente geotérmica del manto durante el inicio de la convergencia Jurásica.

*Fuente: "Andean Plutonism in Peru and its Relationship to Volcanism and Segmented Plate Edge", Cobbing, E. y Pitcher, W. (1983)

El modelo conceptual actual para la formación de un arco magmático en el contexto de un marco tectónico de subducción está ligado a los siguientes factores; ángulo de subducción, velocidad de convergencia (placa), cuña astenosférica, compuestos volátiles y el espesor de la litósfera sobre la zona donde se da la generación de magmas;

todos estos factores conducen la fusión parcial de la corteza como se muestra en la figura 5,4.

La figura 5,4 es un clásico ejemplo de lo que hoy se considera a los magmas de arco como un producto de la fusión hidratada de la cuña astenosférica. Las distintas características que poseen los magmas de arco son debido al metasomatismo de la cuña astenosférica por fluidos aportantes desde la corteza oceánica durante este proceso (Tatsumi, T., *et al.*, 1986).

Los procesos magmáticos asociados a la base de la litósfera son considerados parte del proceso MASH (Magma, Asimilación, Segregación y Homogenización), estas zonas se encuentran en la corteza interior o en el límite corteza – manto, zona donde los magmas de composición basálticos de origen primario que ascendieron desde la cuña del manto alcanzan un nivel neutro, es en este lugar donde ocurre fusión parcial asociados a asimilación y mezcla, terminando en una cristalización del magma o el ascenso de estos por la diferencia de densidades producto del fraccionamiento (Muñoz, M., 2011) (ver figura 5,4).

- **Superunidades Intrusivas**

Para la zona Sur de Perú se ha reconocido la presencia de seis superunidades intrusivas como se muestra en la figura 5,7, las cuales son descritas a continuación:

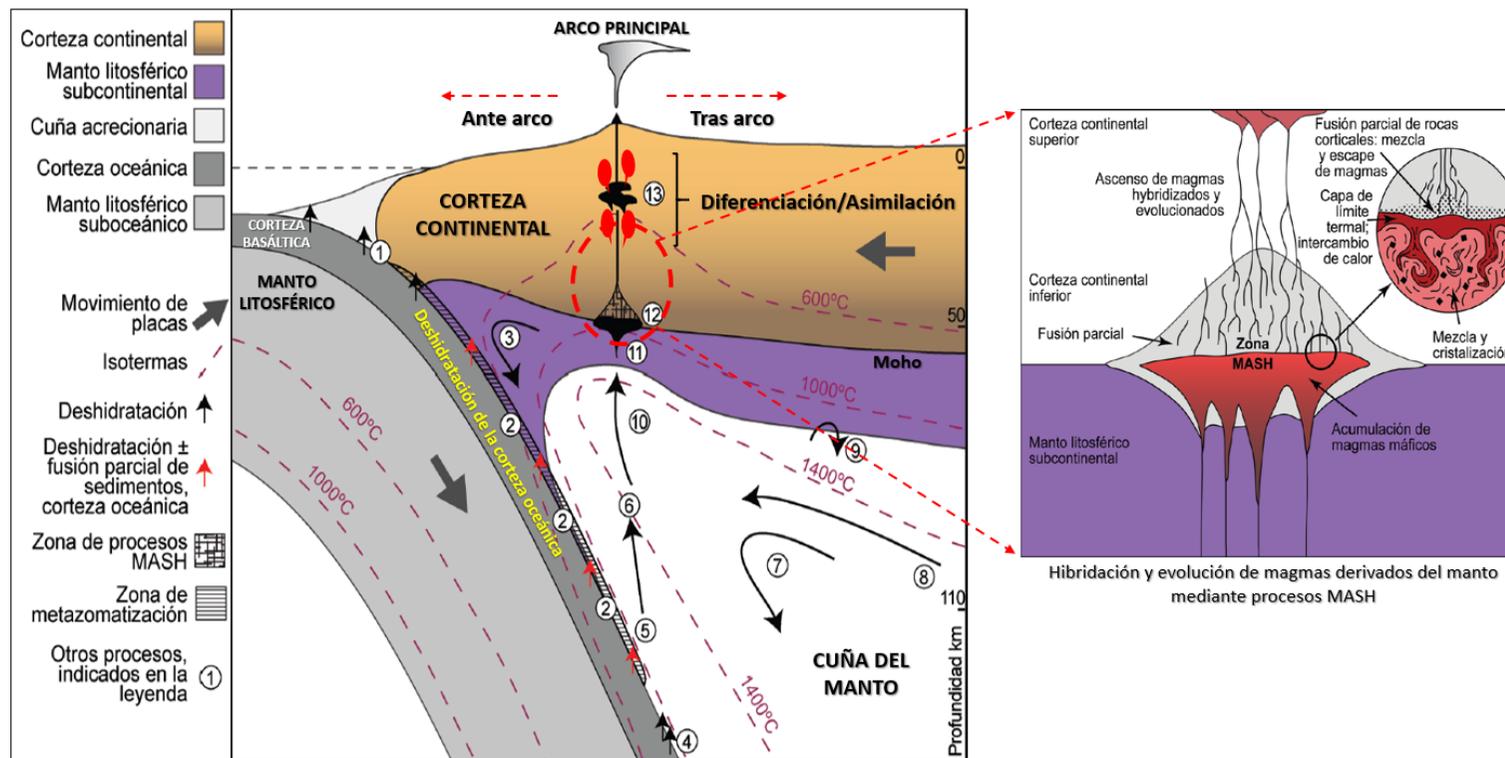


Figura 5,4 Se muestra la deshidratación de la placa subducida (Nazca), hidratación y fusión de la cuña del manto heterogéneo. Los procesos MASH pueden ocurrir bajo estas condiciones, así estos materiales producen magmas tonalíticos/granodioríticos.

1) Deshidratación y pérdida de fluidos, 2) Deshidratación de la corteza oceánica y manto, 3) Arrastre del Manto metazomatizado inducido por la subducción, 4) Deshidratación profunda de distintas fases minerales, 5) Inicio de la fusión hidratada del manto ~1100°C, 6) Migración de fundidos a la base de la columna de fusión, 7) Flujo astenosférico inducido por la subducción, 8) Aporte de material a la columna de fusión por advección (transporte de fluidos) del manto astenosférico, 9) Enriquecimiento de la astenosfera producto de la delaminación del manto litosférico subcontinental, 10) Fusión por descompresión a partir de ~60 km de profundidad, 11) Segregación de fluidos a la base de la litósfera suprayacente, 12) Zona de interacción y cristalización de los magmas provenientes del manto en niveles litosféricos profundos (MASH), 13) Cristalización y asimilación en zonas corticales someras.

*Fuente: Modificado de Pearce, J. y Peate, D. (1995) y Richards, J. (2003)

- Superunidad Punta Coles

Forma parte del batolito Jurásico, constituido por plutones irregulares remanentes de composición diorítica-gabroica cloritizadas (Sánchez, A., 1983a), son intruidos y cortados por la superunidad Ilo (tonalitas). Dataciones en U/Pb sobre zircones muestran edades entre 188.4 y 184 Ma (Mukasa, S., 1986) correspondiendo al periodo Jurásico Inferior.



Figura 5,5 Batolito de la Costa, desde Venezuela hasta la Patagonia (Chile y Argentina).
 *Fuente: “Rocas Ígneas en el sur del Perú. Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30’ Latitud Sur”, Martínez, W. y Cervantes, J. (2003)

- **Batolito de la Costa**

El Batolito de la Costa abarca desde Venezuela hasta la Patagonia (Chile-Argentina) como se muestra en la figura 5,5. Es un batolito múltiple de edad Mesozoica y compuesto por superunidades, emplazado en el borde continental producto de la subducción de la Placa de Nazca. Esta faja orogénica también es conocida como una “Cordillera Magmática” (Winter, J., 2001).

Superunidad Ilo

Forma parte del segmento de Toquepala del Batolito de la Costa. Corresponden a stocks de composición tonalíticos-granodioríticos. Dataciones en K/Ar muestran edades de 103 Ma en muestras de granodioritas correspondiendo al periodo Cretácico.

Superunidad Linga

Corresponde a las rocas más antiguas del segmento de Arequipa del Batolito de la Costa. Constituido por rocas de composición monzoníticas. Según dataciones radiométricas, esta se emplazó hace 97 Ma, correspondiendo al Cretácico Superior (Cobbing, E. y Pitcher, W., 1983).

Superunidad Tiabaya

Es la roca más joven del segmento Arequipa del Batolito de la Costa. Constituido por rocas de composición tonalitas-monzogranitos, aunque la mayor parte de los intrusivos aflorantes son de composición granodiorita. Característico por ser leucócrata y presentar xenolitos de minerales máficos en la matriz de la roca.

Por lo general la Superunidad Tiabaya es más rica en cuarzo que las demás unidades del segmento de Arequipa.

Superunidad Yarabamba

Compuesta por tonalitas a granodioritas con presencia de xenolitos alterados de composición máfica (Stewart, J., 1968). Estudios posteriores describen que esta Superunidad está compuesto por granodioritas a monzogranitos, que afloran como cuerpos tabulares y elongados en dirección predominante NO-SE, identificados en las localidades de Yarabamba, Omate, Palca, Vitor, Puquina y Torata (Cobbing, E. y Pitcher, W., 1983; Pitcher, W., *et al.*, 1985).

Dataciones radiométricas por los métodos K/Ar, Ar/Ar, Rb/Sr y U/Pb muestran edades entre 62 a 58 Ma, dataciones en U/Pb a zircones muestran edades entre 67.4 a 54.3 Ma (Simmons, A., 2013), correspondiendo a la época Paleoceno Inferior.

Intrusivo Challaviento

Corresponde a intrusivos de composición granodioríticos que afloran en los cuadrángulos de Palca y Pachía, se encuentra xenolitos en la zona de contacto o cercano a ello, los cuales componen entre el 20 a 30% de la roca (Wilson, J. y García, W., 1962).

Esta Superunidad es descrita como el Plutón de Tarata y Ataspasca, se encuentra aflorando a lo largo de sistema de fallas Incapuquio hacía el norte y NE de Palca, petrográficamente está compuesta por granodioritas de tonalidad gris clara y presentando una textura hipiomórfica (Acosta, H., *et al.*, 2011). Estudios posteriores lo describen bajo el nombre de Batolito Challaviento (Martínez, W. y Cervantes, J.,

2003 y Acosta, H., *et al.*, 2011) propone el nombre de Superunidad Challaviento según las consideraciones geoquímicas, petrográficas, geocronológicas, ubicación y extensión, compuesto por granodioritas, dioritas, gabro y granitos.

Dataciones radiométricas muestran una edad de 41.6 Ma (Martínez, W. y Cervantes, J., 2003), correspondiendo a la época del Eoceno medio.

En la figura 5,6 y 5,7 se observa las intrusiones y el emplazamiento que componen las Superunidades del Batolito de la Costa.

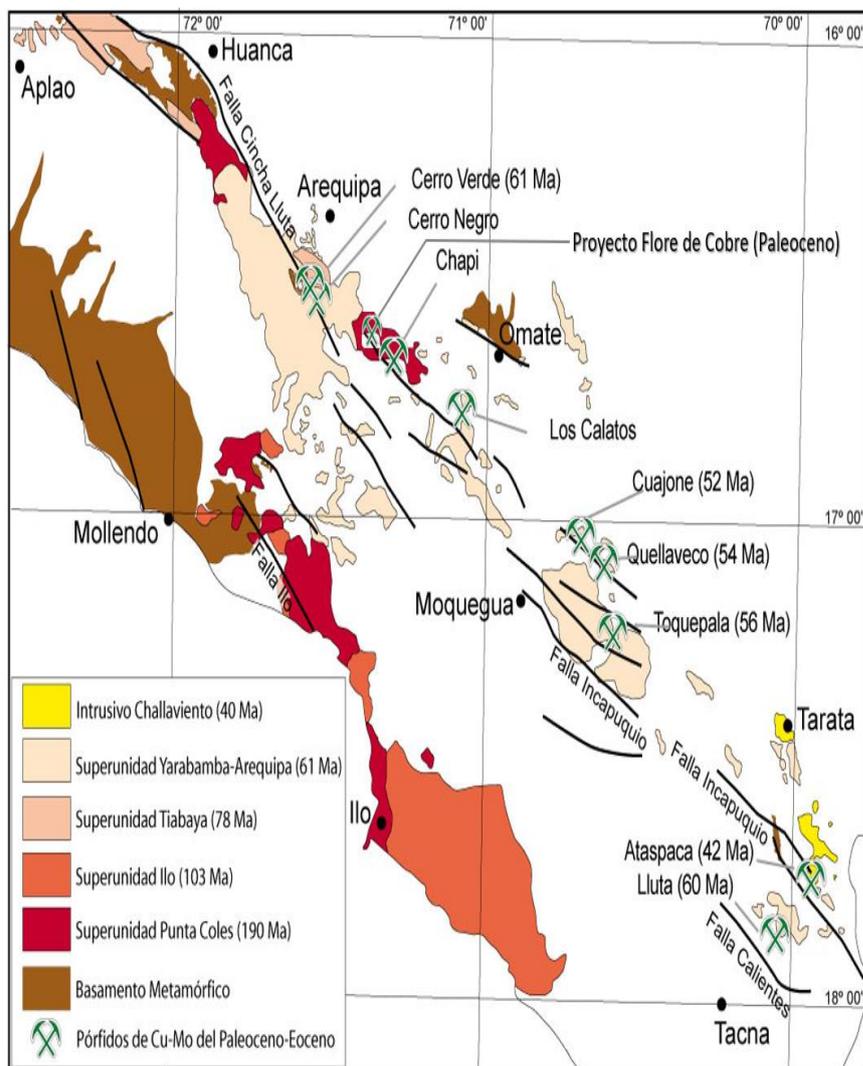


Figura 5,6 Mapa de ubicación de los principales yacimientos de la franja de pórfidos de Cu-Mo del Paleoceno-Eoceno, el entorno tectónico y rocas intrusivas.

*Fuente: Modificado de Acosta, Harmuth *et al.* (2010)

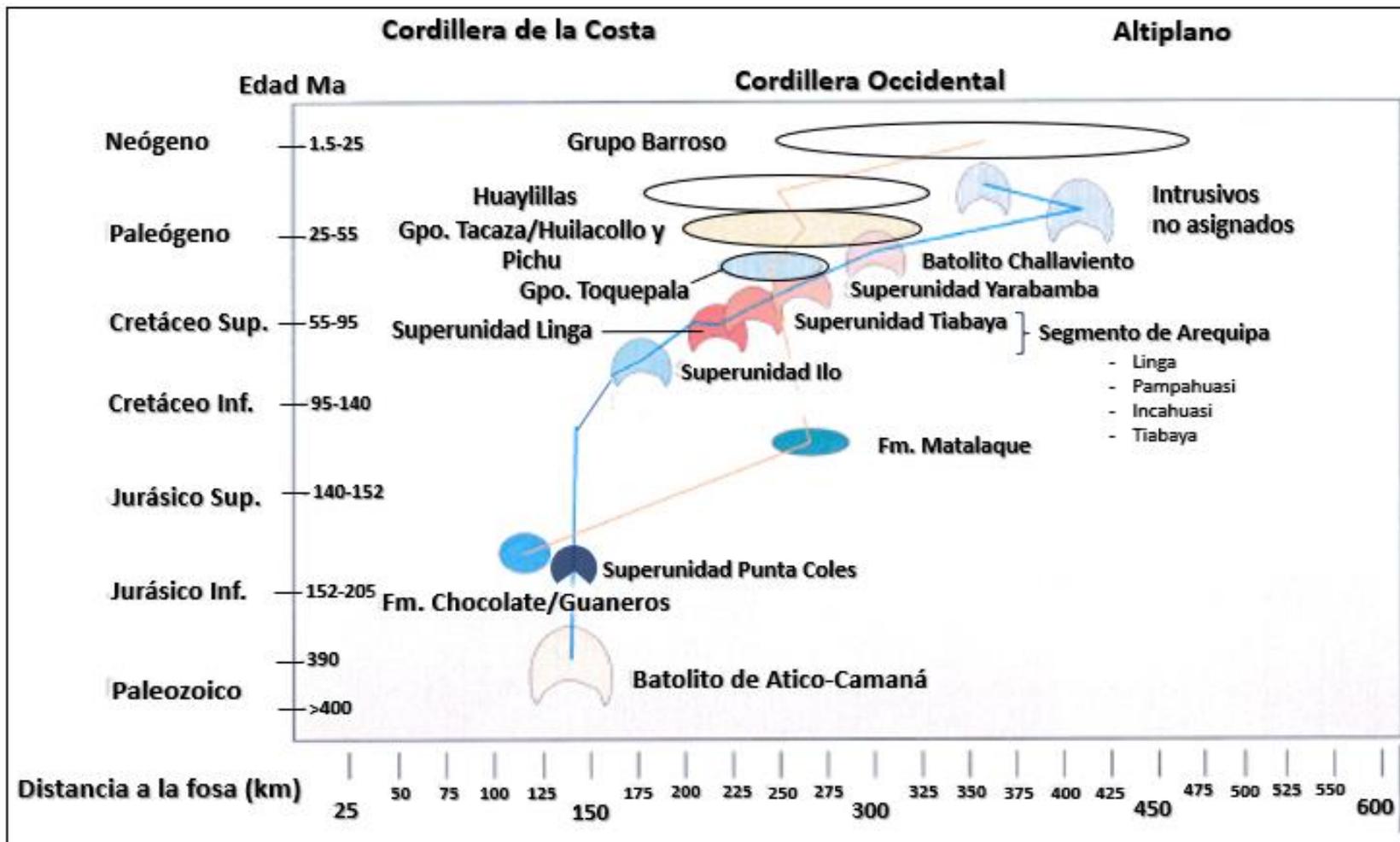


Figura 5,7 Relaciones de tiempo – espacio de los magmas que dieron origen a las Superunidades que conforman el Batolito de la Costa en la Región Sur del Perú.

*Fuente: Basado en “Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes”, Pitcher, W., et al. (1985)

5.2.1.3 Tectónica en el sur del Perú

En el sur del Perú, los eventos magmáticos e hidrotermales fueron controlados por sistemas de fallas principales y regionales en dirección NO-SE y que estos a su vez han delimitado dominios geotectónicos para la formación de depósitos minerales.

Como se observa en las figuras 5,8 y 5,13, para el sur del Perú se han definido los siguientes sistemas de fallas regionales y dominios geotectónicos:

Sistema de fallas regionales principales:

- Sistema de Fallas Nazca-Ocoña (SFNO)
- Sistema de Fallas Cincha-LLuta. (SFCLL)
- Sistema de Fallas Incapuquio (SFI)
- Sistema de Fallas Caylloma-Condoroma (SFCC)
- Sistema de Fallas Cusco-Lagunillas-Mañazo (SFCLM)
- Sistema de Fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri (SFUSA).

Dominios geotectónicos:

- Dominio Geotectónico Nazca-Ocoña (DGNO)
- Dominio Geotectónico Cincha- LLuta-Ilo (DGCLLI)
- Dominio Geotectónico Puquio-Caylloma-Incapuquio (DGPCI)
- Dominio Geotectónico Abancay-Condoroma (DGAC)
- Dominio Geotectónico Cusco-Lagunillas-Mañazo (DGCLM)
- Dominio Geotectónico Urcos-Sicuani-Ayaviri (DGUSA)

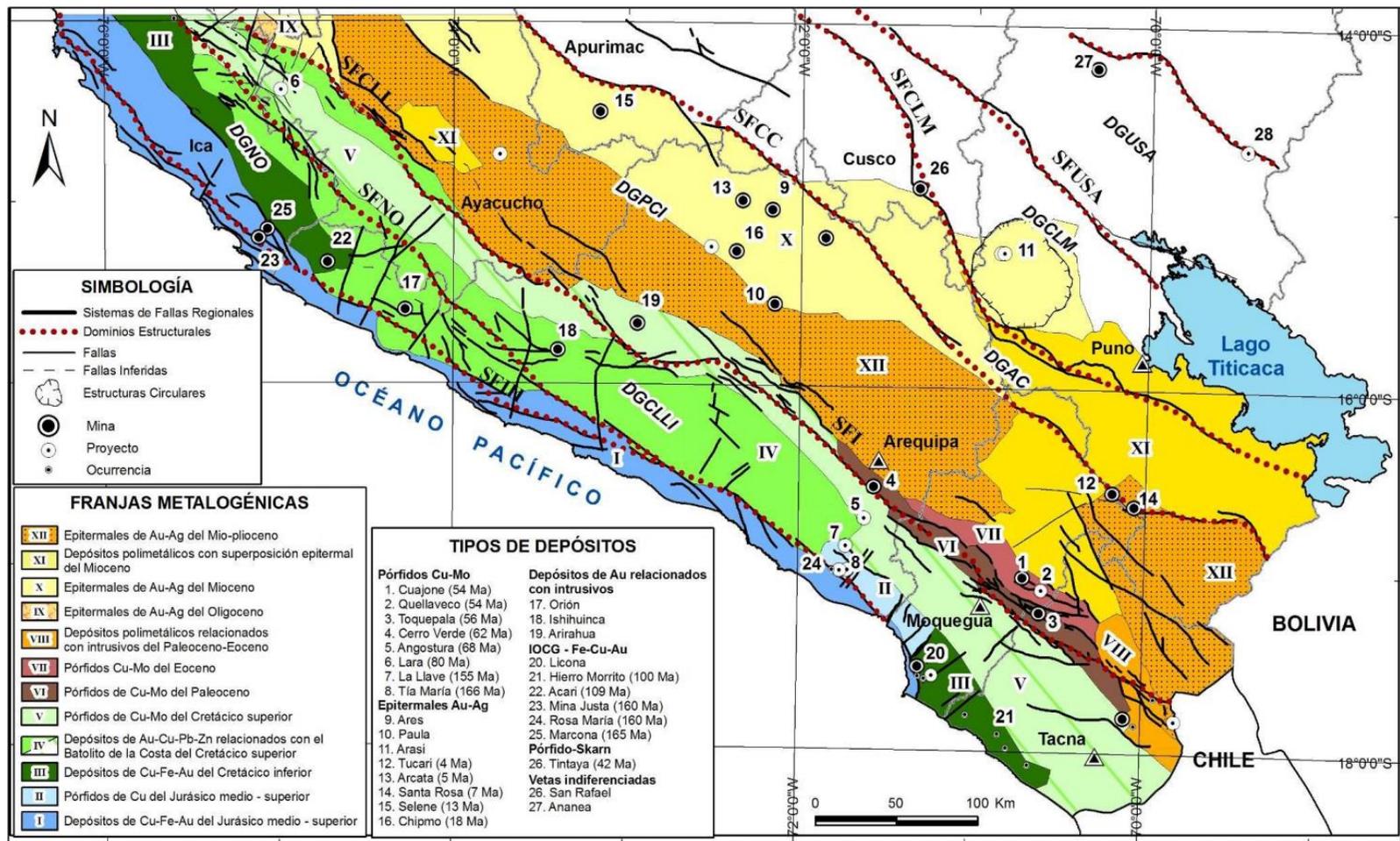


Figura 5,8 Mapa metalogénico del sur del Perú resaltado los sistemas de fallas regionales principales y los dominios geotectónicos.
 *Fuente: “Épocas metalogénicas y tipos de yacimientos metálicos en la margen Occidental del Sur del Perú: Latitudes 14°S – 18°S”, Acosta, J., et al. (2008)

5.2.1.4 Cinemática de subducción

De acuerdo con los conceptos de tectónica de transcurrencia en un margen oblicuo-transpresional, se ha identificado distintas direcciones de convergencia de la placa de Nazca desde la época del Cretácico Superior (70 Ma) hasta la actualidad (Pardo, F. y Molnar, P., 1987), se distingue alrededor de cuatro variaciones, los cuales son; 60-70 Ma (N-S), 45-55 Ma (N45°), 25-10 Ma (E-O) y 0-10 Ma (N78°).

El magmatismo originado en la época del Jurásico se interpreta como una convergencia oblicua y una cinemática dextral-transtensiva. Para las épocas del Cretácico al Paleógeno se tuvo una cinemática dextral y del Paleógeno a la actualidad una cinemática sinestral.

Entre los 80 y 160 Ma (Jurásico-Cretácico), la placa oceánica (Nazca) subductada era de mayor ángulo, relativamente fría y de poca velocidad, produciendo una mayor interacción de la cuña mantélica mediante mayores flujos geotérmicos originando un adelgazamiento cortical, por lo tanto, este adelgazamiento generó la formación de un trasarco de depósitos marinos (Grupo Yura). Durante esta época se tuvo un magmatismo pasivo o ausencia de este, ya que no se tienen evidencias de cambios geoquímicos o petrográficos importantes.

A partir de los 70 Ma cambiaron las condiciones magmáticas, empieza una convergencia en dirección N-S y se emplaza un sistema de transpresión con la generación de abundante actividad magmática continental que duro aproximadamente 15 Ma (75-60 Ma) (ver figura 5,9). Este régimen dextral originó anomalías distensivas

y la formación de cuencas pull-apart por donde se emplazaron los cuerpos intrusivos, dando lugar a la formación de principales yacimientos porfiríticos del sur del Perú.

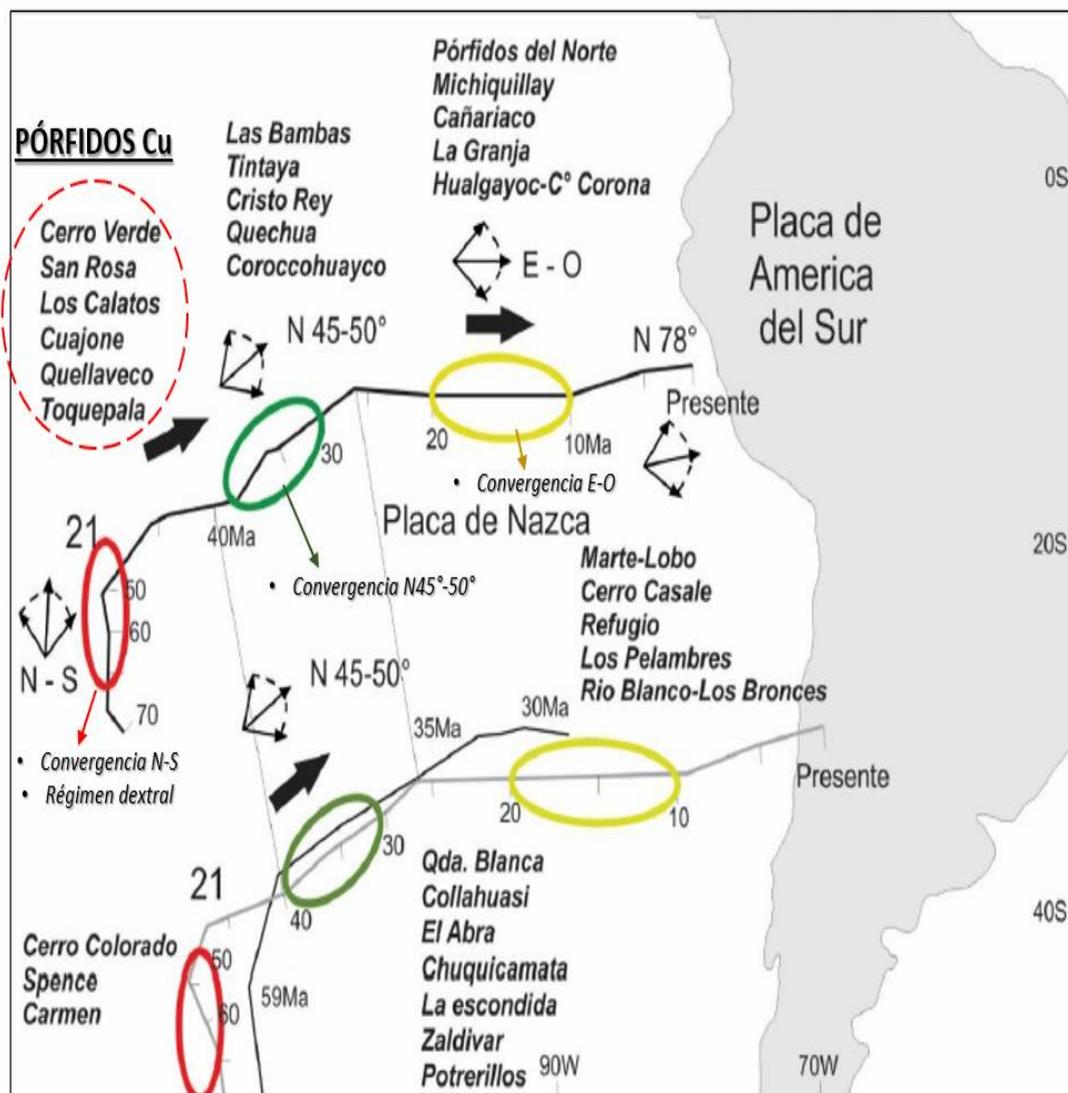


Figura 5,9 Relaciones de direcciones de convergencia y los mayores yacimientos porfiríticos entre Perú y Chile – se observa la correspondencia entre las dos líneas de desplazamiento de placa oceánica (Nazca).

*Fuente: Tomado y modificado de Makshev, V. y Zentilli, M. (1999)

5.2.1.5 Evolución Tectónica

El origen de los yacimientos en el Sur del Perú que se encuentran relacionados con el Batolito de la Costa y ocurrió durante tres épocas metalogénicas distintas que abarcan desde el Jurásico Medio al Cretácico Superior.

A. Jurásico Medio-Cretácico Inferior: para los depósitos tipo pórfido de Cu y yacimientos tipo IOCG, ocurrió cuando existía una corteza extendida-caliente a partir de los ~240 Ma (Periodo del Triásico Medio) y en un régimen tectónico de extensión-transtensión, con magmas de composición basáltico a intermedio como se muestra en la figura 5,10 (Sillitoe, H., 2003 y Sillitoe, R. y Perelló, J., 2005).

En esta época se dio una marcada migración del sistema arco-cuenca hacia el oeste y se detuvo alrededor de los 130 Ma, para luego reanudar en la dirección este.

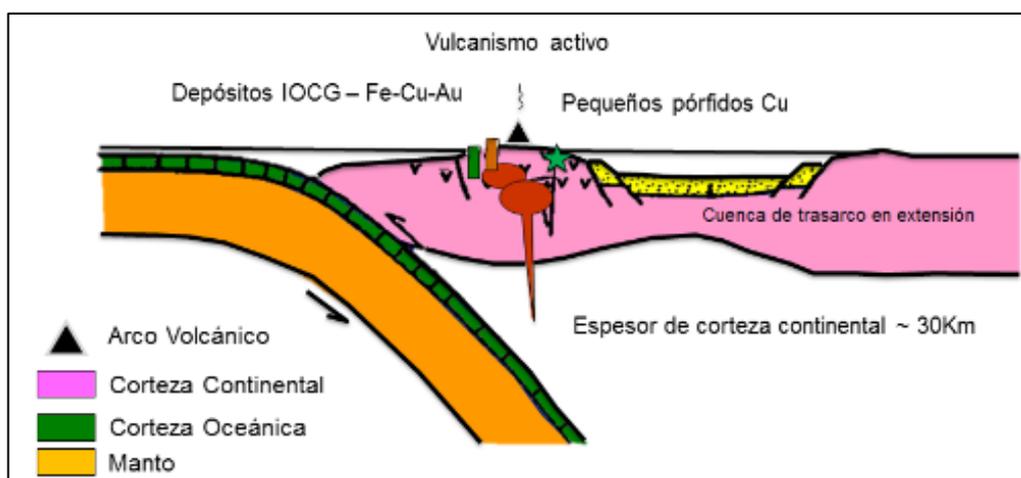


Figura 5,10 Arco volcánico en régimen extensión-transtensión durante el Jurásico Medio-Cretácico Inferior con un magmatismo toleítico a calcoalcalino y un ángulo de slab mayor.
*Fuente: "Evolución Tectónica y Metalogénesis del Perú", Acosta, J. y Sempere, T. (2017)

B. Paleoceno-Eoceno Superior: La génesis de los grandes pórfidos de Cu-Mo y sus ocurrencias polimetálicas estuvieron controladas por el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) con una dirección entre N310°-N315° y antiguos lineamientos

oblicuos a los Andes con dirección N50°-70°, los cuales fueron cortados y desplazados por el SFI (ver figura 5,13).

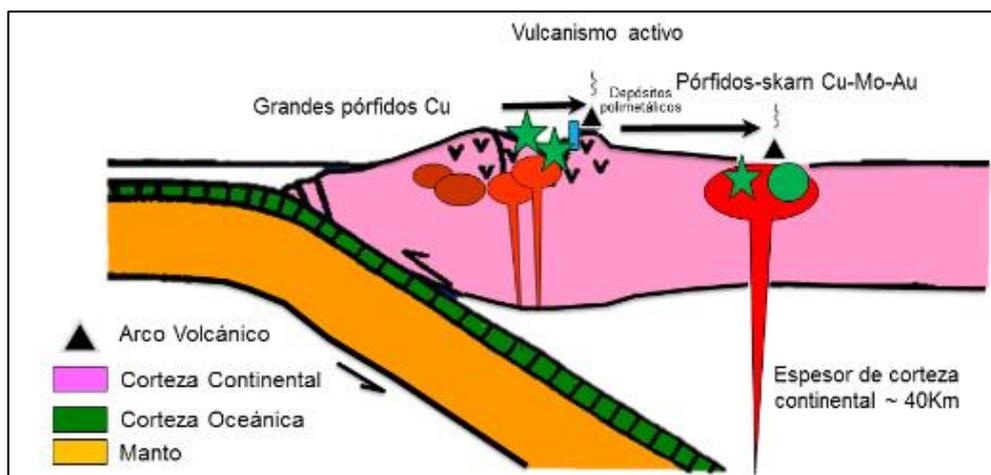


Figura 5,11 Arco volcánico en régimen neutral y extensión media en el Paleoceno-Eoceno Inferior con un magmatismo calcoalcalino y un ángulo de slab moderado.

*Fuente: "Evolución Tectónica y Metalogénesis del Perú", Acosta, J. y Sempere, T. (2017)

Estas estructuras se interceptaron originando una zona de debilidad estructural en la corteza por donde se dio las condiciones favorables para el emplazamiento de intrusivos magmáticos entre los 50 y 70 Ma (ver figura 5,11).

C. Del Oligoceno al Plioceno se formaron depósitos polimetálicos de Au-Ag en yacimientos epitermales donde la mineralización de estos se encuentra controlada por la litológica y las estructuras asociadas al Sistema de Fallas Condoroma-Cailloma (SFCC) (ver figura 5,13), relacionado también a un engrosamiento de la corteza (mayor a 40 km) y disminución del ángulo de subducción como se muestra en la figura 5,12 (Sillitoe, H. y Perelló, J., 2005).

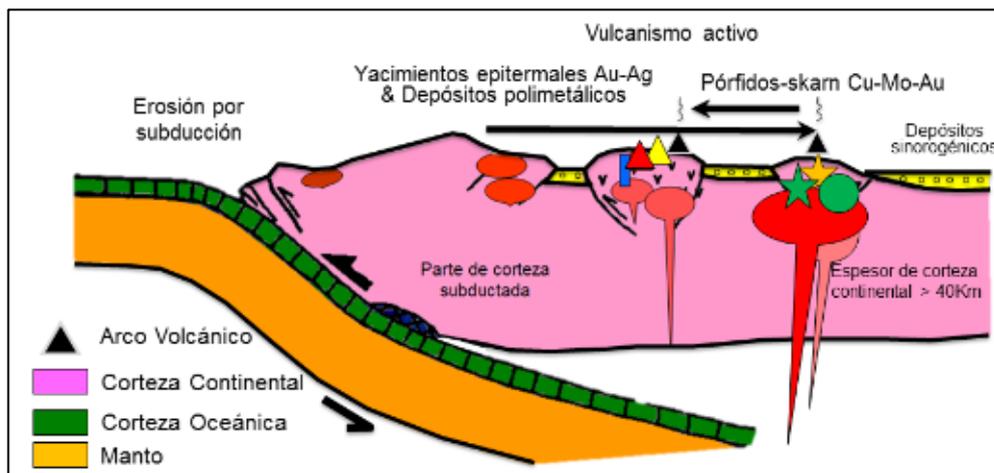


Figura 5,12 Arco volcánico en régimen de compresión del Oligoceno Inferior y Mioceno-Plioceno Inferior, con un magmatismo calcoalcalino a alcalino y ángulo de slab menor.
 *Fuente: “Evolución Tectónica y Metalogénesis del Perú”, Acosta, J. y Sempere, T. (2017)

Según la cinemática y evolución tectónica en la región sur, para la generación de un depósito porfirítico es necesario un tiempo de estabilidad tectónica de velocidad constante por más de 10Ma y darse las condiciones de homogenización magmática (MASH), por lo que las intersecciones a lo largo del SFI son áreas potenciales para exploración, principalmente en el Grupo Toquepala y Batolito de Yarabamba del Paleoceno-Eoceno y los terrenos del Jurásico con relación a sus intrusivos porfiríticos.

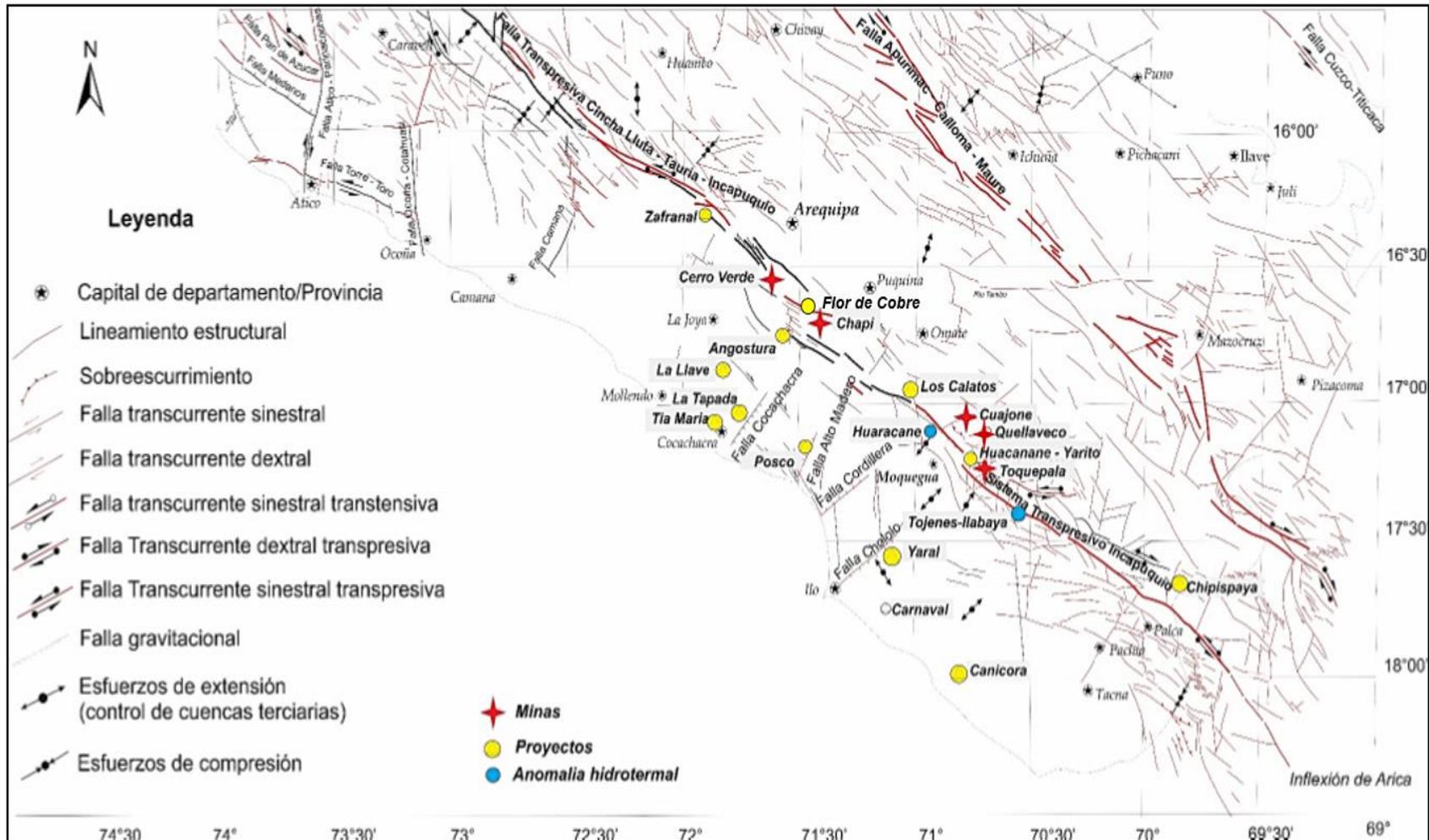


Figura 5,13 Mapa estructural con los mayores sistemas de fallas translitosféricas y lineamientos, depósitos de pórfidos y proyectos - Sur del Perú.
 *Fuente: "Geología y Controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental Sur de Perú", Martínez, W., et al. (2017)

5.2.2 Geología local de pórfidos de cobre del Sur del Perú

Los principales depósitos tipo pórfido de cobre ubicados en la región sur del Perú están relacionados con un magmatismo entre el Jurásico-Cretácico y el Neógeno (Mioceno), el marco estructural está dominado por el SFI, donde se emplazaron gran parte de estos depósitos porfiríticos conocidos (ver figura 5,13), y también, relacionados a los metalotectos Grupo Toquepala y Superunidad Yarabamba.

Los procesos de alteración y mineralización están asociados a últimos pulsos magmático-hidrotermales. La composición de la roca caja es por lo general diorítica a monzonítica (Superunidad Yarabamba). La mineralización económica se encuentra asociada principalmente a los stocks porfiríticos previamente emplazados. La alteración propilítica abarca gran parte del depósito y se encuentra extendida hacia los bordes del sistema, la mayor mineralización de cobre se encuentra asociada a las alteraciones potásica y fílica y estando casi ausentes en las alteraciones argílica y propilítica. El enriquecimiento supérgeno se produjo desde el Eoceno Superior (38 Ma) al Plioceno (5 Ma), siendo el Mioceno medio (14-11 Ma) la época con mayor enriquecimiento supérgeno y que coincide con las ignimbritas que cubren gran parte del territorio sur del Perú conservando los sistemas porfiríticos.

Existe gran potencial de encontrar depósitos tipo pórfido de cobre entre los yacimientos Cerro Verde-Chapi (36 km), Chapi-Los Calatos (50 km), Los Calatos-Cuajone (60 km) y Toquepala-Chipispaya (50 km), considerando que posiblemente estén soterrados por los eventos vulcano-sedimentarios de las unidades Moquegua, Sotillo, Huaylillas y Millo, así también en la franja Jurásica entre Tía Maria-Posco (ver figura 5,14).

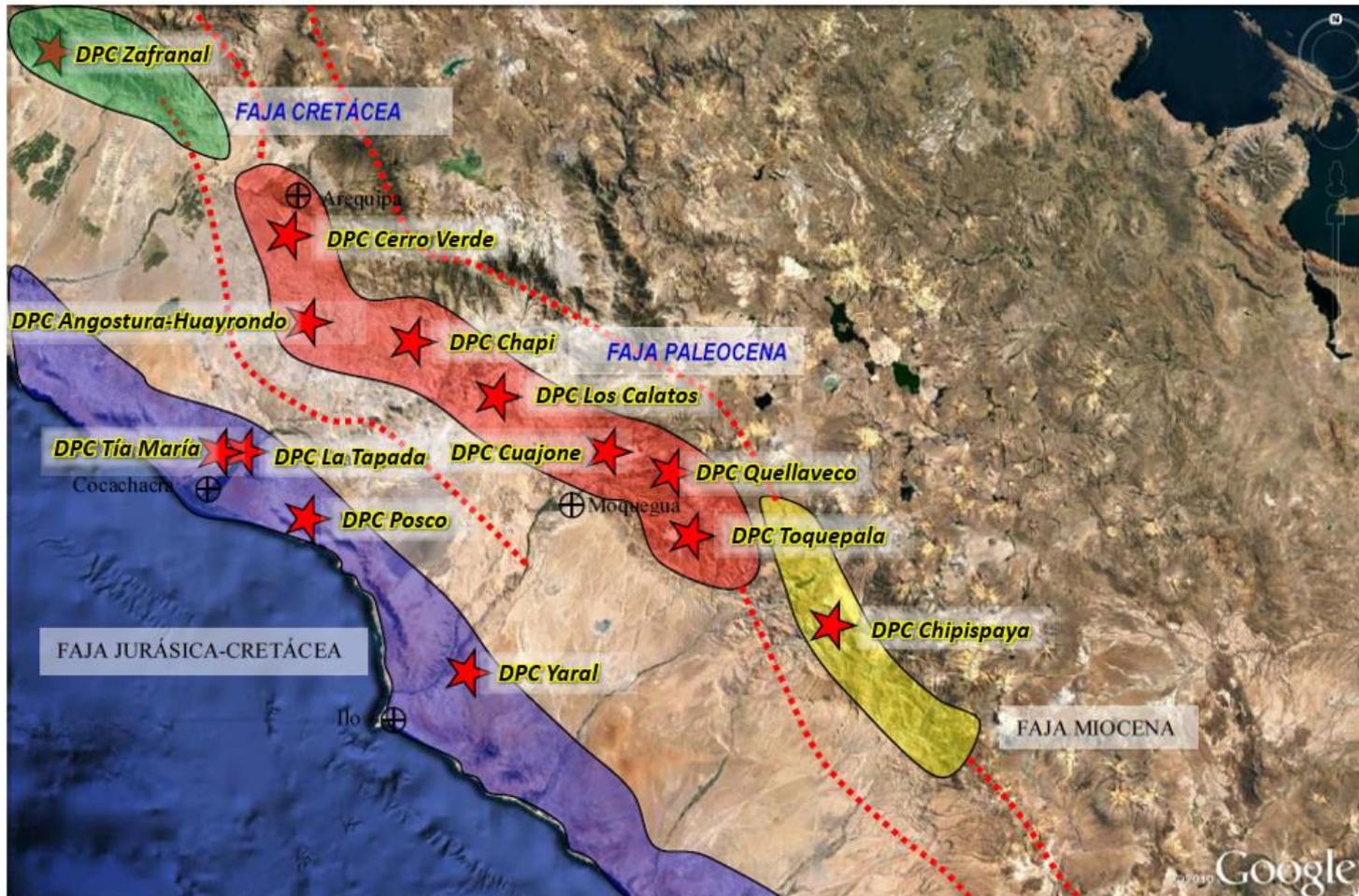


Figura 5,14 Imagen Satelital de los depósitos porfiríticos al sur del Perú. Jurásico-Cretácico (Tía María, La Tapada, Posco, Yaral), Cretácico (Zafranal), Paleoceno-Eoceno (Cerro Verde, Angostura, Chapi, Los Calatos, Cuajone, Quellaveco, Toquepala) y Mioceno (Chipispaya).

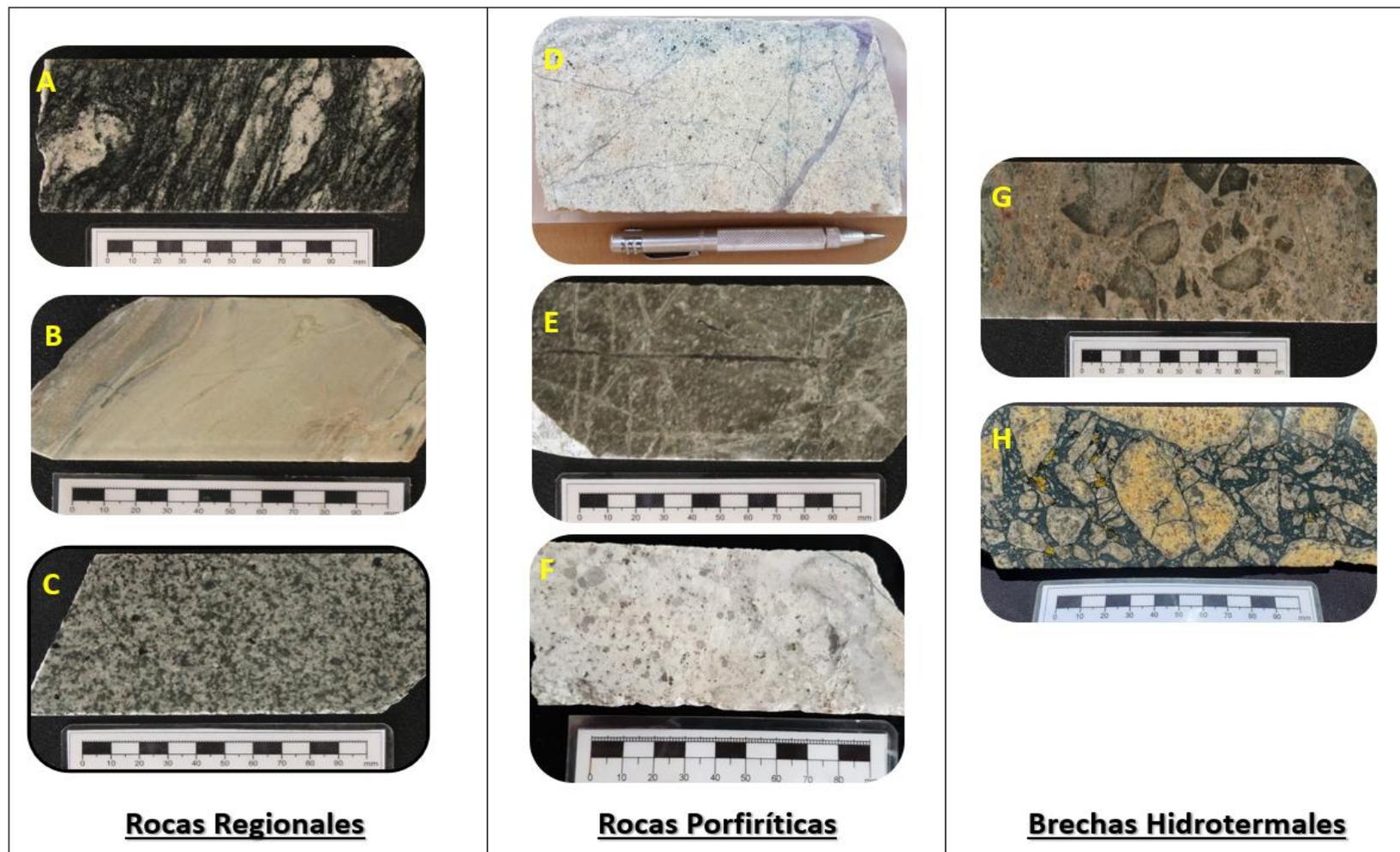
*Fuente: “Geología y Controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental Sur de Perú”, Martínez, W., et al. (2008)

5.2.2.1 Petrografía

Principalmente están compuestos por dioritas porfiríticas (Proyecto Lara, Proyecto Valetita, Proyecto Zafranal y Yacimiento Chapi), dioritas-granodioritas porfiríticas (Proyecto Tía María y Yacimiento Cuajone), dacitas-monzonitas porfiríticas (Yacimiento Cerro Verde, Yacimiento Toquepala y Proyecto Chipispaya) y monzodioritas porfiríticas (Yacimiento Quellaveco), asociados a un magmatismo calco-alcalino a alcalino.

Los yacimientos tipo pórfido de cobre están relacionadas a intrusiones ígneas epizonales múltiples (polifásicos), formada genéticamente a partir de un magma parental asociado a las superunidades a las cuales intruyen (Superunidad Tiabaya, Superunidad Incahuasi, Superunidad Yarabamba, Superunidad Punta Coles). Dichas unidades magmáticas albergan una serie de depósitos, los mismos que intruyen al basamento conformado por el Complejo Basal de la Costa. Todos estos eventos magmáticos forman grandes depósitos de minerales de cobre de baja ley y gran tonelaje, asociados y distribuidos a lo largo del corredor andino del SFI con orientación preferencial NO-SE.

Los pórfidos se emplazan aprovechando las condiciones estructurales favorables (fallas y/o zonas de debilidad), también se menciona la ocurrencia de múltiples eventos de formación de brechas hidrotermales que por lo general ocurren en los niveles altos del sistema (brechas freáticas, freatomagmáticas, brechas de colapso y brechas cuarzo-turmalina), los mismos que se desarrollan por el descenso brusco de la temperatura y presión asociado a intrusiones porfiríticas tardías estériles (ver figura 5,15).



Rocas Regionales

Rocas Porfíricas

Brechas Hidrotermales

*Figura 5,15 Tipos de rocas de un Yacimiento tipo Pórfido de Cobre – Sur del Perú. A) Gneis del Complejo Basal de la Costa, B) Arenisca del grupo Yura, C) Granodiorita de la Superunidad Yarabamba, D, E y F) Dacitas-Monzonitas Porfíricas, G, H) Brechas hidrotermales
Fuente: Elaboración propia

5.2.2.2 Alteraciones hidrotermales

Los procesos de alteraciones hidrotermales asociados a los yacimientos porfiríticos están relacionados a eventos magmático-hidrotermales que ocurren a profundidades variables entre 1 a 3 km como resultado de la interacción de los fluidos de origen magmático y aguas de origen meteórico (ver figura 5,16). Los fluidos magmáticos o hidrotermales son soluciones multicomponentes electrolíticas, donde los solutos están compuestos por cloruros alcalinos (cloruros de sodio, cloruros de potasio, cloruros de calcio) y la presencia de metales a nivel traza predominantemente en forma de iones complejos en estas soluciones.

La extensión y la intensidad está en función de controles estructurales, litológicos, evolución magmática, composición del fluido hidrotermal, temperatura, pH, composición de la roca huésped, tiempo de interacción agua/roca y permeabilidad de la roca.

- Fase Prógrada

Corresponde a la fase inicial de la alteración hidrotermal, se inicia en la etapa tardimagmática o también denominada potásica y asociado al emplazamiento de los stocks porfiríticos del yacimiento. Se forma a temperaturas superiores a 300°C, fluidos hidrotermales altamente salinos (>35-40% en peso equivalente de NaCl), altas razones de K/H⁺ y alta fugacidad de oxígeno y azufre (Beane, R. y Titley, S., 1981), en esta etapa ocurre un reemplazamiento de los minerales petrogénicos, permitiendo la formación de minerales más estables a dichas condiciones.

Esta zona está conformada por feldespatos potásicos secundarios en forma de agregados granulares, cuarzo secundario como agregados granulares y también masivo, biotita

secundaria como microcristales tabulares y también masivo y, anhidrita cristalizada y también masiva; en esta etapa se desarrollan las venillas tipo “A”, tipo “EB” y tipo “M”.

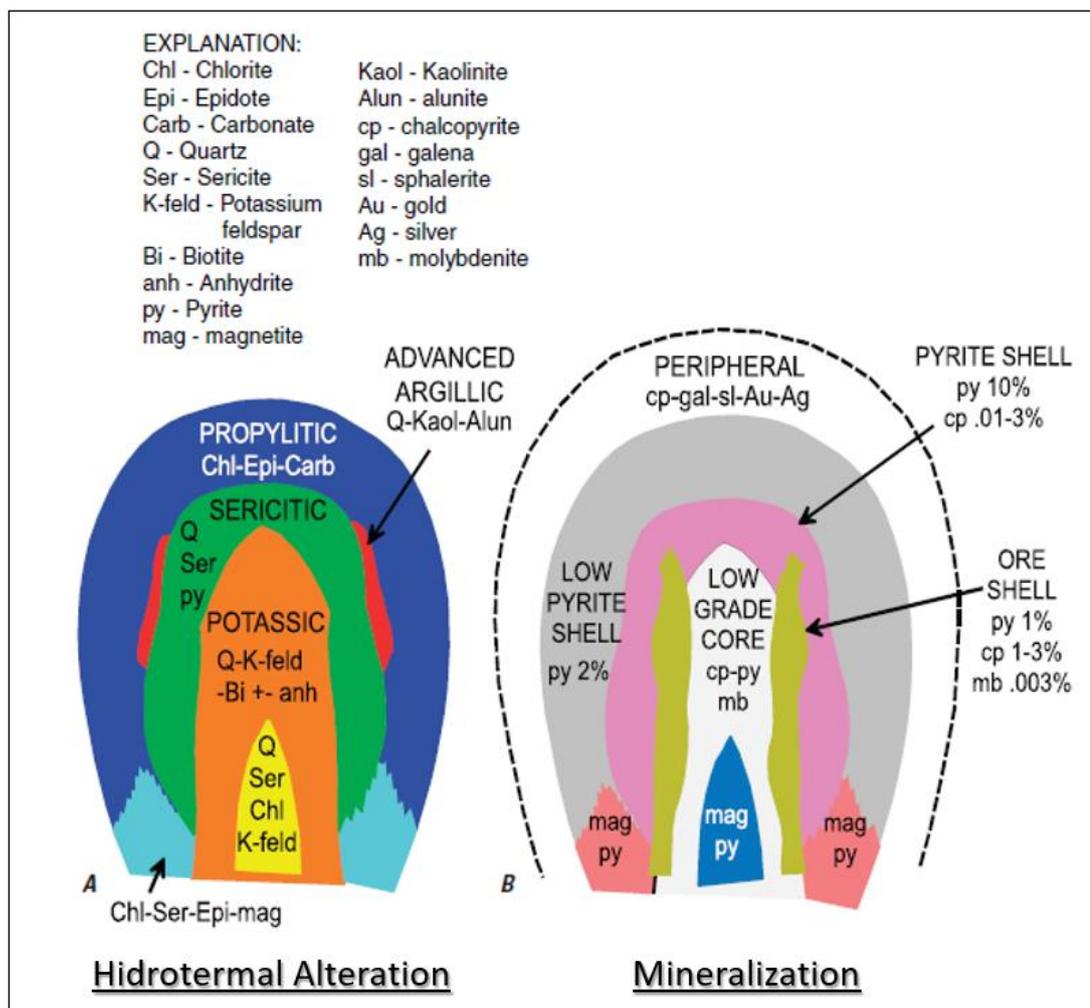


Figura 5,16 Modelo implícito de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre. A) Sección esquemática longitudinal de los tipos de alteración hidrotermal, que incluye a la alteración propilítica, sericitica, argílica avanzada y alteración potásica. B) Sección esquemática longitudinal de los tipos de alteración asociados a la mineralización de cobre.

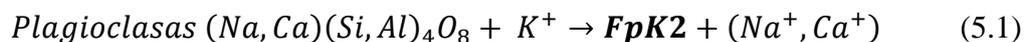
* Fuente: Tomado de “Porphyry Copper Deposit Model”, John, D., et al. (2010)

Alteración potásica del tipo feldespato potásico

Se desarrolla ampliamente hacia el centro del sistema hidrotermal, formado entre 400-800°C y un pH neutro-ácido, está compuesto principalmente por feldespato potásico secundario (FpK2) y cuarzo secundario, aunque para algunas

zonas se da la presencia de biotita secundaria y magnetita, presenta el ensamble de alteración: cuarzo-feldespato potásico secundario-biotita secundaria-magnetita (ver ecuación 5.1). En esta alteración se da un desarrollo moderado de vetillas de anhidrita y vetillas tipo “A”.

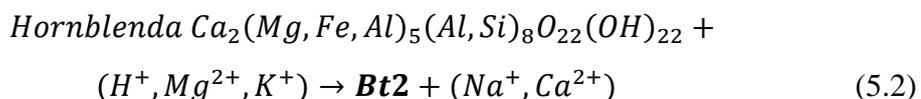
Está asociado a los más altos contenidos de mineralización de cobre del yacimiento, con presencia de calcopirita (Cpy) y bornita (Bn), por lo general presenta una recuperación entre el 90-95% de cobre en el proceso metalúrgico.



Alteración potásica del tipo biotítico

Se presenta en forma de “dos pulmones” dentro de la alteración potásica del tipo feldespato potásico, se caracteriza por estar compuesto principalmente por biotita secundaria que reemplaza a los minerales máficos petrogénicos (hornblenda y biotita primaria), feldespato potásico secundario y cuarzo secundario, se incrementa la presencia de magnetita en esta zona, también se da la presencia de cloritas de forma parcial en algunos sectores, presenta un ensamble de alteración: cuarzo-biotita secundaria-magnetita-feldespato potásico secundario-clorita (ver ecuación 5.2).

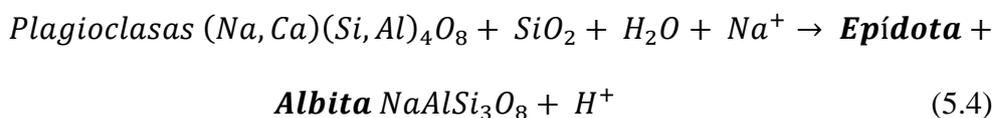
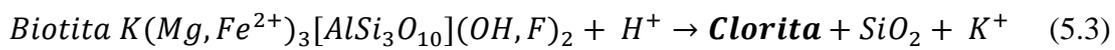
Está asociado a los más altos contenidos de mineralización de cobre del yacimiento dentro de la fase progradada con presencia de calcopirita y bornita, por lo general presenta una recuperación entre el 90-95% de cobre en el proceso metalúrgico.



Alteración propilítica

Se desarrolla hacia los márgenes externos del núcleo de la alteración potásica y representa la parte distal del depósito, se forma entre 200-250°C y un pH neutro a alcalino, el cual corresponde a una fase de menor temperatura y bajo grado de hidrólisis. Esta alteración está constituida por un ensamble mineralógico compuesto por cloritas (formadas a partir de los minerales ferromagnesianos petrogénicos, principalmente biotitas y hornblendas), epidota (formada a partir de las plagioclasas), calcita y piritita (ver ecuaciones 5.3 y 5.4).

Se encuentra asociada a leyes bajas del yacimiento, con contenido pobre y/o casi nulo de cobre, por lo que generalmente se considera material de desmonte.



- Fase retrograda

Constituye una etapa transicional entre la fase tardimagmática y etapas hidrotermales posteriores. Una vez que los stocks porfiríticos han cristalizado y las condiciones de presión y temperatura han disminuido, se produce la incorporación de aguas meteóricas al sistema mediante la percolación de estas por fallas, fracturas o porosidad/permeabilidad de las rocas, las cuales permiten la precipitación de sílice a ~250°C y el reemplazamiento de minerales por otros. En esta etapa se da el desarrollo de vetillas tipo “B” y comúnmente anhidrita, también existe una leve introducción de cobre al sistema, pero es la molibdenita que precipita en su totalidad.

Alteración potásica del tipo clorítico

Se forma por la interacción de la roca con agua meteórica a relativa profundidad, se encuentra por lo general sobreimpuesta a la alteración potásica del tipo biotítico.

Se caracteriza por presentar ensamble mineralógico dominado por las cloritas reemplazando en gran medida a la biotita secundaria o biotita primaria (ver ecuación 5.3), cuarzo secundario y feldespato potásico secundario (ver ecuación 5.1), aunque también podría contener anhidrita y magnetita, pero en menor proporción.

Posee una mineralización económica variable dependiendo de las leyes del yacimiento, su rango de recuperación varía entre 80-90% de cobre en el proceso metalúrgico.

- Fase hidrotermal

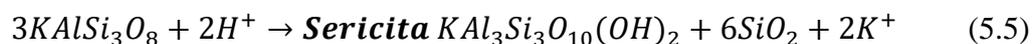
Se desarrolla a medida que los fluidos hidrotermales migran desde el intrusivo magmático y ascienden por la roca caja. Durante su ascenso comienza a enfriarse bajo condiciones de alta actividad de azufre, baja fugacidad de oxígeno y baja razón K^+/H^+ , por lo que la roca afectada es completamente alterada.

Alteración fílica o cuarzo-sericita

Se denomina alteración fílica a las zonas donde se desarrollaron un intenso metasomatismo de hidrógeno (hidrólisis), producto de la interacción de los fluidos hidrotermales con aguas meteóricas, traduciéndose en una disminución del pH de la solución. Se forma entre los 200-350°C y a un pH entre 5-6.

Se produce la intensa alteración de los feldespatos, micas y arcillas, formando principalmente sericita en forma de micro agregados escamosos (ver ecuación 5.5), también presenta dentro de su ensamble mineralógico al cuarzo secundario y en menor proporción minerales arcillosos, en esta alteración predomina también la presencia de pirita formada por las condiciones ácidas y la estabilidad de este mineral a estas condiciones.

Sericitización del feldespato potásico (Ortoclasa)



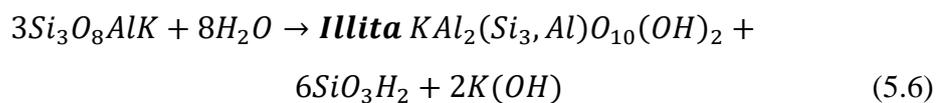
Por lo general está asociado a leyes altas debido a enriquecimiento de cobre, está asociado en gran parte a sulfuros secundarios de cobre como la calcosina-covelina. Su grado de recuperación para esta zona es aproximadamente del 87% de cobre en el proceso metalúrgico.

Alteración argílica intermedia

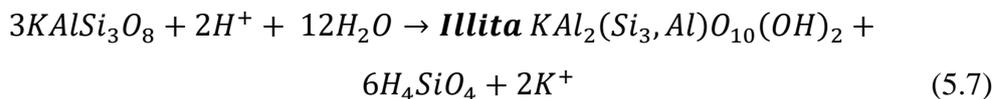
Este tipo de alteración se define como una transición entre la alteración potásica y alteración fílica y formada después de ambas, aquí se desarrolla una moderada hidrólisis con presencia de sodio, calcio y magnesio, removilizado de las rocas por los procesos previos de alteración. Presenta un ensamble de alteración conformado principalmente por clorita que reemplaza a la biotita secundaria (ver ecuación 5.3), los feldespatos potásicos y parte de la biotita secundaria son reemplazados por arcillas (esmectita e illita – ver ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.8) y hematita formada a partir de la magnetita. Hacia los bordes del sistema se encuentra sobrepuesta a la alteración propilítica, evidenciándose con un aumento de cloritas y presencia de montmorillonita.

El contenido de mineral económico es variable en esta zona, por lo general conteniendo mineralización transicional con presencia de calcopirita, calcosina y covelina. Su grado de recuperación fluctúa alrededor del 77% de cobre en el proceso metalúrgico.

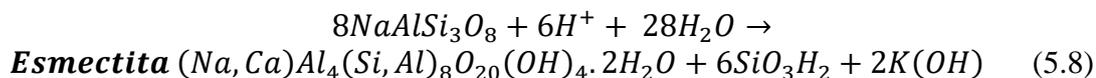
Sanidina a Illita



Ortoclasa a Illita



Albita a Esmectita



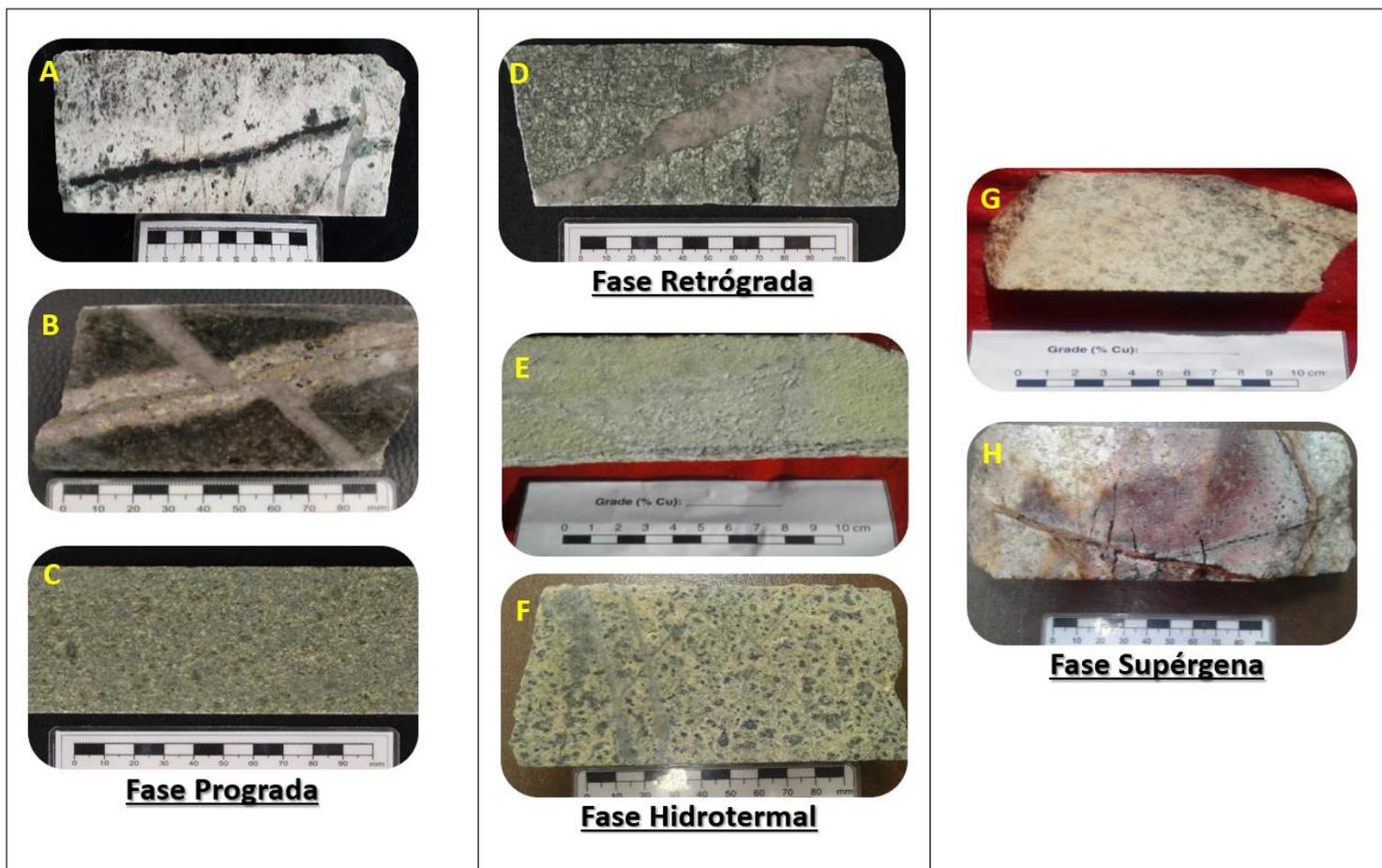


Figura 5,17 Tipos de alteración de un Yacimiento tipo Pórfido de Cobre – Sur del Perú. Tipos de alteraciones pertenecientes a la Fase Prograda: A) Potásica del tipo feldespato potásico, B) Potásica del tipo Biotítico, C) Propilítica. Tipos de alteraciones pertenecientes a la Fase Retrograda: D) Potásica del tipo Clorítico. Tipos de alteraciones pertenecientes a la Fase Hidrotermal: E) Fílica, F) Argílica Intermedia. Tipos de alteraciones pertenecientes a la Fase Supérgena: G, H) Argílica Supérgena

*Fuente: Elaboración propia

- Fase supérgena

La etapa supérgena se da por un proceso de equilibrio entre los procesos hidrotermales hipógenos y las condiciones oxidantes que se encuentran cercana a la superficie terrestre (fase hidrolítica). Sobre el nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), la mayoría de los minerales sulfurados de cobre son inestables, por lo que son alterados con facilidad y formando o reemplazados por nuevos minerales.

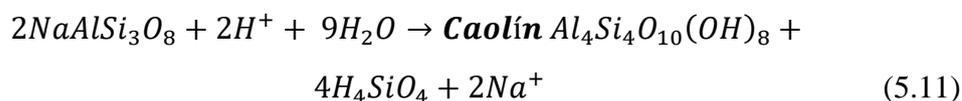
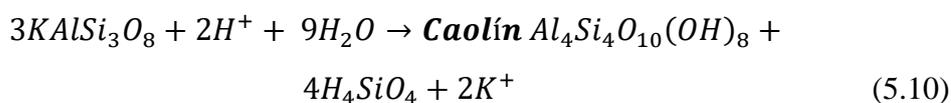
Alteración argílica

Se desarrolla en los niveles altos del sistema y la interacción con aguas meteóricas, sobreimponiéndose y alterando a las alteraciones preexistentes. En esta zona se forma entre los 150-300°C con un pH entre 3-4, se da el reemplazamiento por arcillas (principalmente caolín) de minerales petrogénicos o minerales alterados previamente (ver ecuaciones 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12).

Caolinitización de la sericita



Caolinitización de los feldspatos



Caolinitización de la Illita



5.2.2.3 Mineralización

La mineralización en los yacimientos tipo pórfido de cobre se encuentra ligada directamente con el emplazamiento de los múltiples eventos intrusivos y alteración hidrotermal progradada, que ha permitido la diseminación de sulfuros primarios de cobre en el sistema (calcopirita y bornita). Debido a los efectos retrógrados se produce un enriquecimiento de calcopirita y molibdenita, en el cual este último precipita en su totalidad. Finalmente, cuando estos depósitos son exhumados por encima de nivel freático, se inicia el proceso de oxidación, lixiviación y re-deposición de minerales de cobre (ver figura 5,18), sin embargo, las variaciones del nivel de aguas subterráneas y la subsecuente erosión podrían reactivar este proceso.

- Procesos hipógenos

Se desarrolla en la fase de la alteración progradada, caracterizándose por la diseminación de calcopirita y bornita principalmente en la matriz de la roca huésped (stocks porfiríticos), las cuales son precipitadas a partir de los complejos clorurados con contenidos metálicos en forma de iones complejos en la fase líquida hipersalina, con rangos de temperatura entre 350-550°C.

Por efectos de ebullición retrogrado se da la formación de enjambres de vetillas (stockwork), los cuales enriquecen el sistema hacia las zonas superiores y laterales de los stocks porfiríticos como se muestra en la figura 5,19. En la fase de alteración retrógrada, el molibdeno es transportado por complejos oxiclорuros en fase líquida hipersalina y precipita en la formación de vetillas tipo “B” o también diseminado en la matriz de los stocks porfiríticos.

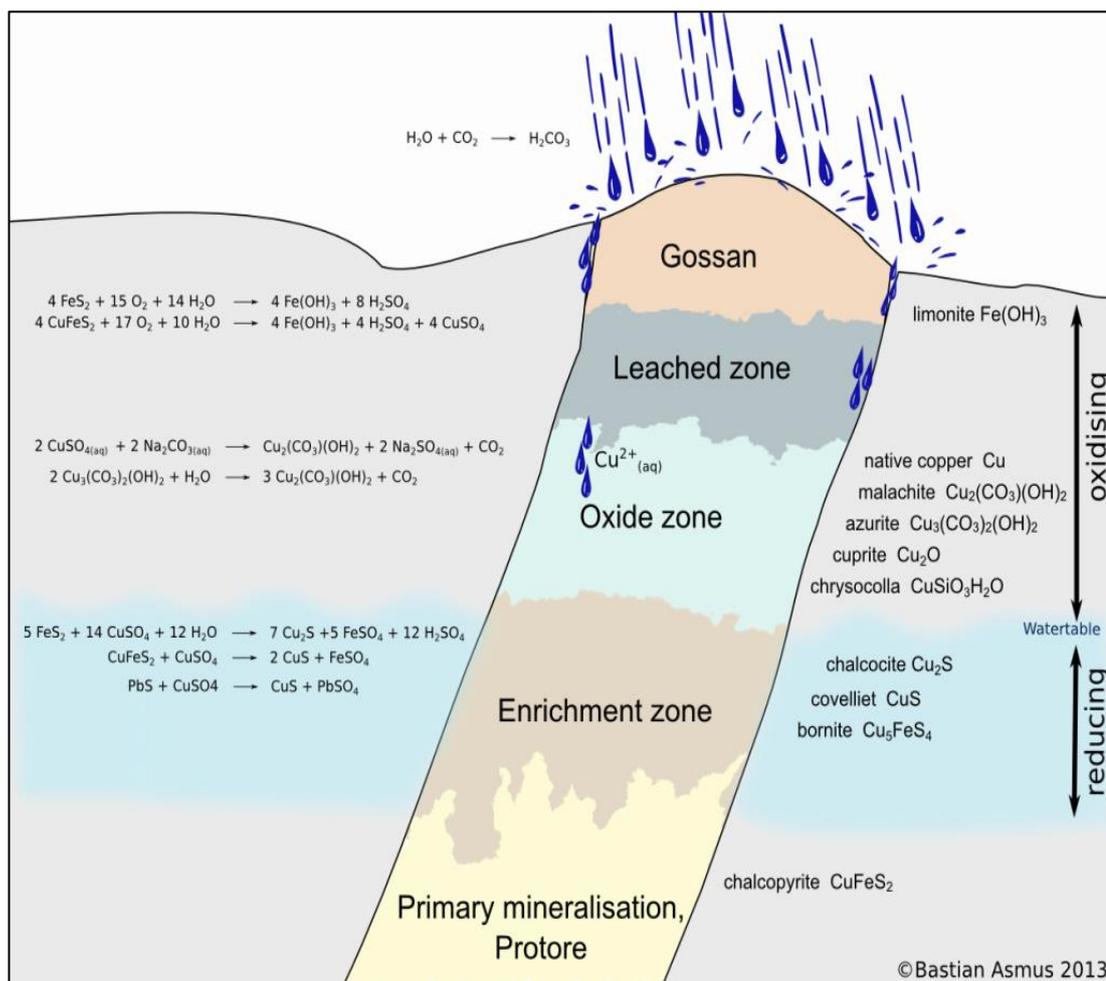


Figura 5,18 Vista esquemática de un perfil de mineralización para un yacimiento tipo pórfido de cobre con las reacciones que ocurren para cada zona. Se observa la zona de oxidación que está representando por el Gossan, la zona lixiviada y oxidada (con presencia de oxígeno) y, la zona de reducción (sin presencia de oxígeno) donde se produce un enriquecimiento de cobre.

* Fuente: Modificado por Ottaway, B., (1994) y Evans, A. (1992)

Mineralización primaria

Su formación se da por los múltiples eventos intrusivos porfíricos y sus correspondientes alteraciones que han permitido en mayor o menor medida la diseminación de Cu y Mo a través de los compuestos clorurados y oxiclорuros en fase líquida como se muestra en la ecuación 5.13.

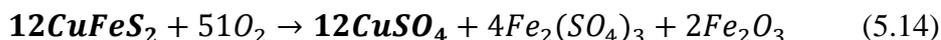


- Procesos supérgenos

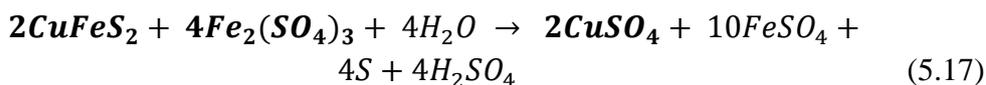
La meteorización, que resulta en oxidación y/o enriquecimiento supérgeno, es un proceso importante en la viabilidad económica de muchos depósitos pórfido de cobre (Sillitoe, H. y McKee, E., 1996; Sillitoe, H., 2005). La mineralización supérgena se forma cuando los metales contenidos en la roca huésped se transportan en aguas meteóricas oxidadas. El movimiento descendiente se da a través de la porosidad y permeabilidad de las rocas, aunque un movimiento lateral podría darse en áreas con gran relieve topográfico. El enriquecimiento supérgeno ocurre cuando los fluidos ácidos oxidantes disuelven los iones metálicos del mineral hipógeno y los vuelven a depositar en áreas más reductoras y de pH más alto, es decir, por debajo del nivel freático. Esto da como resultado, una zona superior lixiviada y oxidada (gossan), una zona supérgena debajo del gossan y una zona primaria por debajo de estas.

Las reacciones de disolución de la pirita y calcopirita están dadas por las siguientes reacciones:

Oxidación de la Calcopirita y formación de sulfato de cobre



Oxidación de la Pirita y disolución de la calcopirita formando sulfato de cobre



En las ecuaciones 5.15, 5.16 y 5.17; nos indica que 8 moles de pirita (8FeS_2) son necesarios para disolver 2 moles de calcopirita (2CuFeS_2). Según las reacciones 5.14

y 5.17, se da la formación de sulfato de cobre que posteriormente serán removilizado hacia zonas de enriquecimiento supérgeno.

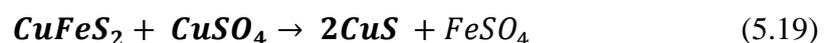
Mineralización secundaria

En el proceso supérgeno, la lixiviación de cobre en las partes superficiales es buena (Leach Capping), favorecido por la presencia de pirita (amplia zona de desarrollo de alteración fílica). Variaciones de nivel freático generan soluciones ácidas percolantes, lo cual permite el transporte de las soluciones de cobre por debajo de nivel de las aguas subterráneas donde precipitará como sulfuros supérgenos de cobre. Bajo el nivel de aguas subterráneas, el oxígeno está prácticamente ausente y es allí donde los sulfatos metálicos en solución reaccionan con los sulfuros hipógenos para formar sulfuros supérgenos o sulfuros secundarios como se observa en la ecuación 5.18.

Precipitación de Calcosina en Pirita



Precipitación de Covelina en Calcopirita



Según las ecuaciones 5.14, 5.15, 5.17, 5.18 y 5.19; para formar 7 moles de Calcosina ($7\text{Cu}_2\text{S}$) es necesario 8 moles de Pirita (8FeS_2) y 14 moles de Calcopirita (14CuFeS_2) y, para formar 2 moles de Covelina (2CuS) es necesario 1 mol de Calcopirita (CuFeS_2) y 1 mol de sulfato de cobre (CuSO_4).

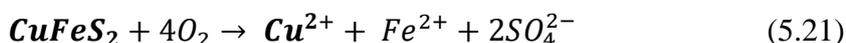
Mineralización transicional

Es una zona donde coexisten minerales secundarios de cobre formados por el enriquecimiento en los procesos supérgenos (calcosina, covelina) y minerales sulfuros de cobre primarios formado durante los procesos hipógenos (calcopirita, bornita).

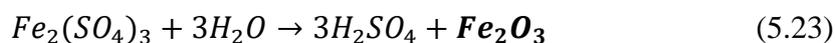
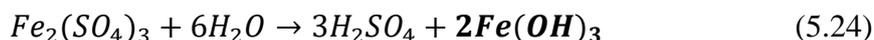
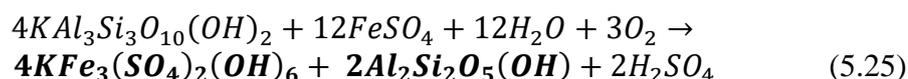
Durante la percolación de las soluciones de cobre, se presentan una disminución en iones de cobre mientras van formando calcosina y covelina en el sistema principalmente asociado a la alteración fílica, parte de las soluciones siguen percolando hacia mayor profundidad, hasta llegar a zonas donde solo ocurre el reemplazamiento parcial de parte del contenido de pirita por calcosina hasta agotar las soluciones de cobre, coexistiendo así zonas mixtas donde se encuentra calcopirita junto con calcosina y covelina.

Mineralización de óxidos de cobre

Durante el desarrollo de los procesos supérgenos, los minerales primarios presentes se oxidan por la influencia directa de las aguas meteóricas que percolan por fracturas, fallas o zonas de permeabilidad, produciendo la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfatos solubles de cobre, estas soluciones descienden hacia el nivel freático interactuando con minerales de la roca en su descenso, si la roca posee alto contenido de feldespato potásico o presencia considerable de carbonatos, estas soluciones se neutralizan y se hacen más básicas, por lo que antes de llegar al nivel freático originan una zona oxidada enriquecida con sulfatos, carbonatos y óxidos de cobre (brocantita, calcantita, malaquita, crisocola, etc).

Formación de la Malaquita*Oxidación de la Calcopirita y Formación de la Cuprita***Capa lixiviada (“Leach Capping”)**

Corresponde a la parte más superficial del sistema, su formación se debe inicialmente a la presencia de pirita (FeS_2), el cual se oxida en la zona de oxidación formando sulfato férrico (FeSO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) (ver ecuación 5.15), compuestos que luego son disueltos por la interacción con las aguas meteóricas formando iones de SO_4^{2-} , H^+ , Fe^{3+} (ver ecuación 5.14) y Fe^{2+} (ver ecuación 5.17, 5.18 y 5.19), estos iones funcionan como componentes lixiviantes, produciendo la disolución de los metales en forma de sulfatos y su movilización o transporte descendente. Esta zona está constituida principalmente por óxidos de hierro (hematita), hidróxidos de hierro (goetita) y sulfatos de hierro (jarosita) como se muestran su formación en las ecuaciones 5.23, 5.24 y 5.25.

Formación de la Hematita*Formación de la Goetita**Formación de la Jarosita y Caolinita*

5.2.3 Análisis de la información

Los datos obtenidos de los análisis de laboratorio se correlacionaron mediante gráficos de dispersión utilizando el software Microsoft Excel, también se comparará esta información mediante gráficos de doble entrada entre solubilidad de minerales de cobre en ácido sulfúrico versus solubilidad de minerales de cobre en cianuro de sodio con el mismo software.

De las correlaciones y grupos identificados, se realizaron perfiles por zonas de mineralización en base las características similares que comparten cada zona.

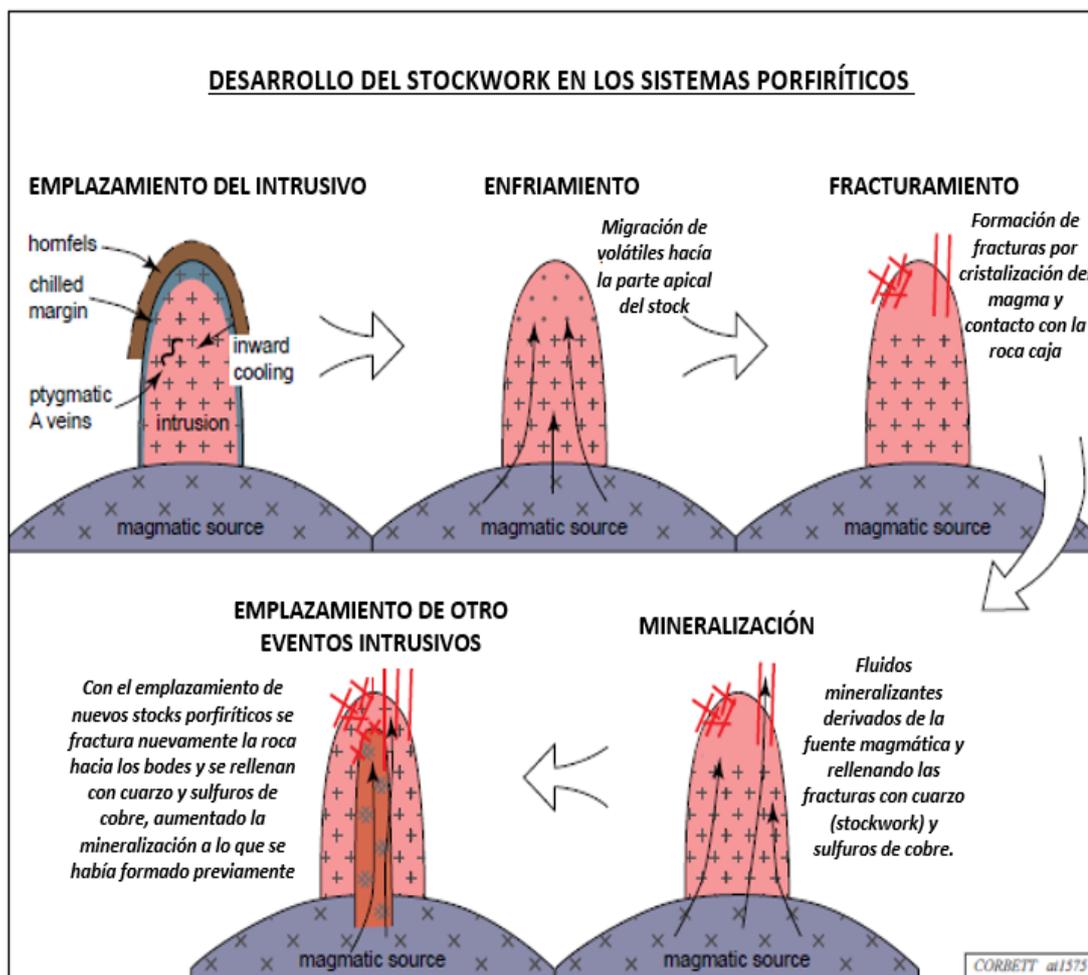


Figura 5,19 Desarrollo del stockwork y la mineralización en los sistemas pórfido de cobre.

* Fuente: Tomado y modificado de "Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration", Corbett, G. (2018)

5.2.4 Análisis de Cobre Secuencial

El método de análisis secuencial de cobre es una técnica semicuantitativa que se emplea para definir un zonamiento geológico, mineralógico y metalúrgico aplicado a los yacimientos tipo pórfido de cobre. El método se fundamenta en el comportamiento de disolución parcial en soluciones que contienen cianuro de sodio y ácido sulfúrico, aplicado a los minerales de cobre económicos, tales como; atacamita, azurita, cuprita, crisocola, malaquita, cobre nativo, tenorita (óxidos de cobre), calcosina y covelina (sulfuros secundarios) y calcopirita, bornita (sulfuros primarios) como se muestra en la tabla 5,5 y 5,6.

Tabla 5,5 *Minerales económicos de cobre y el comportamiento soluble en ácido sulfúrico y cianuro de sodio.*

Especie Mineral	Composición Aproximada	% Aproximado de Disolución	
		En Solución de Ácido Sulfúrico	En Solución de Cianuro de Sodio
OXIDOS			
Atacamita	$\text{CuCl}_2(\text{OH})_3$	100	100
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	100	100
Cuprita	Cu_2O	70	100
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100	45
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	100	100
Cobre Nativo	Cu	5	100
Tenorita	CuO	100	100
SULFUROS SECUNDARIOS			
Calcosina	Cu_2S	8	100
Covelina	CuS	5	100
SULFUROS PRIMARIOS			
Bornita	Cu_2FeS_4	2	100
Calcopirita	CuFeS_2	2	7

* Fuente: "The Sequential Copper Analysis Method-Geological, Mineralogical, and Metallurgical Implications", Parkinson, G. y Bhappu, R. (1995)

Se propone un método de análisis secuencial de cobre aplicado a muestras de rocas, mediante este método se determina y estudia la facilidad de lixiviación de los minerales económicos de cobre, así como su zonificación mineralógica en el yacimiento.

Como se muestra en la figura 5,18, desde la capa lixiviada (zona mineralizada con óxidos de cobre), pasando a un sector subyacente con contenido enriquecido de cobre (zona de sulfuros secundarios), hasta el contacto con una zona de cobre hipógena (sulfuros primarios), existen distintas especies minerales de cobre que es de interés identificarlos y estudiarlos, para su tratamiento metalúrgico y recuperación.

La caracterización de estos minerales de cobre en un determinado sector podría llevarnos a la confusión guiado únicamente de una inspección visual de la muestra (Ej. logueo geológico), por lo que este método es capaz de definir zonas de mineralización en base a los valores de solubilidades de cobre.

Tabla 5,6 *Minerales de cobre y sus solubilidades en ácido sulfúrico y cianuro de sodio.*

COPPER MINERALOGY						
Copper Mineral	Chemical Formula	Characteristics	Cyanide Solubility		Acid Solubility	
			Rate	Range(%)	Rate	Range(%)
Antlerite	$\text{Cu}_2\text{SO}_4(\text{OH})_4$	<i>emerald/black-green, 3.5H, Orthorhombic</i>				
Atacamite	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	<i>green, 3.5H, Orthorhombic</i>				
Azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	<i>azure-blue, 3.5H, Monoclinic</i>	fast	92-95%	fast	83-99%
Bornite	Cu_5FeS_4	<i>iridescent purple/blue, 3.0H, Isometric</i>	mod-fast	70-96%	slow	0.6-3.0%
Brochantite	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	<i>bright green, 4.0H, Monoclinic</i>			fast	?
Calcanthite	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	<i>sky-blue, 2.5H, Triclinic</i>				H_2O soluble
Chalcocite	Cu_2S	<i>lead-grey, 3.0H, Orthorhombic</i>	fast	54-93%	slow	1-50%
Chalcopyrite	CuFeS_2	<i>brassy yellow, 4.0H, Tetragonal</i>	slow	6%	slow	1-2%
Pure Chrysocolla	$\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	<i>bluish-green, 3.0H, Monoclinic</i>	slow	12%	fast	86-100%
Chrysocolla	$(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	<i>bluish-green, 2.0-4.0H, Monoclinic</i>	slow	12%	fast	86-100%
Conichalcite	$\text{CaCu}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$	<i>green, 4.5H, Orthorhombic</i>				
Copper	Cu	<i>metallic</i>	fast	90%	moderate	6-35%
Covellite	CuS	<i>indigo-blue, 2.0H, Hexagonal</i>	fast	53-96%	slow	3-4%
Cuprite	Cu_2O	<i>ruby-red, 4.0H, Isometric</i>	fast	82-97%	fast	67-88%
Digenite	Cu_9S_5	<i>deep blue to black, 3.0H, cubic</i>				
Diopside	$\text{CuSiO}_2 \cdot (\text{OH})_2$	<i>emerald-green, 5.0H, Hexagonal</i>				
Enargite	$3\text{CuS} \cdot \text{As}_2\text{S}_5$	<i>black-iron grey, 3.0H, Orthorhombic</i>	moderate	66%	slow	2%
Kroehnkite	$\text{Na}_2\text{Cu}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	<i>blue-sky blue, 3.0H, Monoclinic</i>				
Libethnite	$\text{Cu}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$	<i>light-dark green, 4.0H, Orthorhombic</i>	fast	78-99%	fast	97-100%
Malachite	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})$	<i>emerald-green, 4.0H, Monoclinic</i>	fast	100	fast	100
Natrocalthite	$\text{NaCu}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$	<i>emerald-green, 4.5H, Monoclinic</i>				
Tenonite	CuO	<i>steel-grey to black, 3.5H, Monoclinic</i>	fast	100	fast	100
Tennantite	$(\text{Cu,Fe,Zn,Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$					
Tetrahedrite	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_{14}\text{S}_{13}$	<i>steel-grey to black, 3.0-4.0H,</i>	slow	22%	slow	2%
Turquoise	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	<i>light blue-green, 5.5H, Triclinic</i>				

* Fuente: "Mineralogical Analysis - Geo-Metallurgy Laboratory of Newmont Company", Orlich, G. (2001)

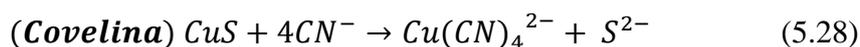
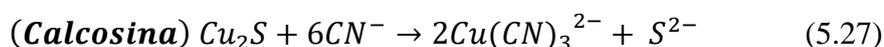
Los resultados obtenidos por este método analítico nos permiten obtener las cantidades de mineral lixiviable utilizando ácido sulfúrico y cianuro de sodio, los cuales se relacionan y se comparan con respecto a cobre total. La reacción general que describe la lixiviación de un mineral de cobre es la siguiente:



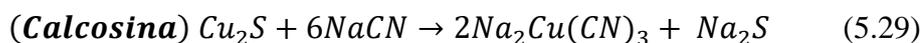
5.2.5 Solubilidad de minerales de cobre con cianuro

Para los yacimientos porfiríticos, uno de los agentes lixiviantes utilizado para el estudio del comportamiento de los minerales de cobre es el cianuro de sodio, este compuesto es propuesto y usado como un agente disolvente-complejante, el cual su aplicación es utilizada para definir principalmente a los sulfuros secundarios de cobre y/o algunas especiales minerales que tengan la capacidad de disolverse en este compuesto.

El cianuro de sodio es capaz de disolver rápidamente sulfuros secundarios de cobre en ausencia de un agente oxidante, por lo que estos minerales sulfurados se solubilizan bajo condiciones normales de cianuración formando los complejos de cianuro de cobre $[\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}]$ y $[\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-}]$, como se muestran en las siguientes reacciones químicas:



O también:

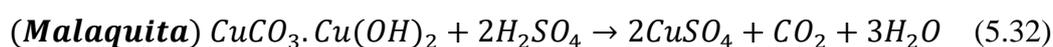
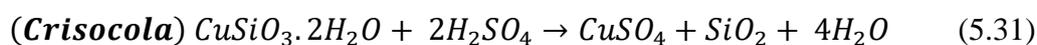


5.2.6 Solubilidad de minerales de cobre con ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico (H_2SO_4), es el compuesto más utilizado y eficiente para la disolución de los minerales oxidados de cobre, esto se debe a que la química que implica la solubilización está basada en una descomposición simple de los minerales de cobre como se muestra en las ecuaciones 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36.

Por otro lado, como se mencionó en el punto 5.3.2, los minerales secundarios de cobre se disuelven de forma rápida al contacto con el cianuro de sodio, mientras que la calcopirita (sulfuro primario de cobre) es insoluble en estos compuestos a condiciones normales.

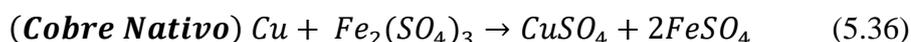
En las siguientes ecuaciones, se muestran las reacciones químicas de disolución en ácido sulfúrico de los minerales oxidados de cobre:



Para el caso de la cuprita, la disolución en ácido sulfúrico de este mineral solo se disuelve la mitad mediante la siguiente ecuación:



Mientras que, para el caso del cobre nativo, su disolución se da con la ayuda de un agente oxidante como podría ser el sulfato férrico mediante la siguiente ecuación:



5.2.7 Método de análisis

El método general consiste en el análisis de las muestras mediante la disolución en ácido sulfúrico (H_2SO_4), con lo cual, el valor obtenido de cobre disuelto corresponde a los minerales oxidados de cobre solubles en ácido, clasificados dentro de la zona de óxidos, seguidamente, utilizando el remanente de la misma muestra analizada, se agrega solución de cianuro de sodio (NaCN), con lo cual, el contenido de cobre disuelto corresponde a los minerales secundarios de cobre y/o bornita, solubles en cianuro de sodio. Finalmente, a la muestra sobrante, se realiza ensaye analítico por cobre, con lo que se obtiene el contenido de cobre insoluble en la muestra, llamado también cobre residual, el cual corresponde principalmente a la calcopirita.

El contenido de cobre presente en la muestra (CuT) es la sumatoria del cobre soluble en ácido sulfúrico, cobre soluble en cianuro de sodio y cobre residual (ver ecuación 5.37). Una forma de verificar el proceso de análisis de las solubilidades consiste en que el CuT, debe ser igual al contenido de cobre presente en la muestra analizada mediante otro método.

$$CuT = CuSAc + CuSCn + CuR \quad (5.37)$$

Donde:

- CuT: Cobre total.
- CuSAc: Cobre soluble en ácido sulfúrico.
- CuSCn: Cobre soluble en cianuro de sodio.
- CuR: Cobre residual.

5.2.8 Índice de solubilidad

El índice de solubilidad nos permite clasificar a los minerales de cobre presentes en un yacimiento porfirítico por tipo de mineralización, así mismo, es usado como una variable independiente para el proceso metalúrgico de recuperación.

Las fórmulas de los índices de solubilidad están dadas por:

$$\%ISAC = \frac{CuSAC}{CuT} (100) \quad (5.38)$$

$$\%ISCN = \frac{CuSCn}{CuT} (100) \quad (5.39)$$

Donde:

- %ISAC: Porcentaje de índice de solubilidad en ácido sulfúrico.
- %ISCN: Porcentaje de Índice de solubilidad en cianuro de sodio.
- CuSAC: Cobre soluble en ácido sulfúrico.
- CuSCn: Cobre soluble en cianuro de sodio.

5.2.9 Cálculo experimental para determinación de solubilidades

Para el presente trabajo de investigación, se realizó el análisis secuencial de cobre en el laboratorio de espectrometría de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (FIGMM) de la Universidad Nacional de Ingeniera, donde se determinó la cantidad de cobre soluble en ácido sulfúrico y cianuro de sodio mediante el método de absorción atómica.

5.2.9.1 Cobre soluble

De las muestras seleccionadas, se determinó el cobre soluble en ácido sulfúrico y el cobre soluble en cianuro de sodio mediante el siguiente procedimiento:

- **Preparación de muestras:** como se observan en las figuras 5,20 y 5,21, se realiza un chancado de las muestras hasta que se encuentren pulverizadas, posterior a ello, se realiza el pesado de 10 gramos de cada muestra, continuando con la mezcla de la muestra de 10gr de óxidos de cobre con 100ml de ácido sulfúrico (figura 5,20) y la mezcla de la muestra de 10gr de sulfuros secundarios con 100gr de cianuro de sodio (ver figura 5,21), ambos utilizando matraces de Erlenmeyer.

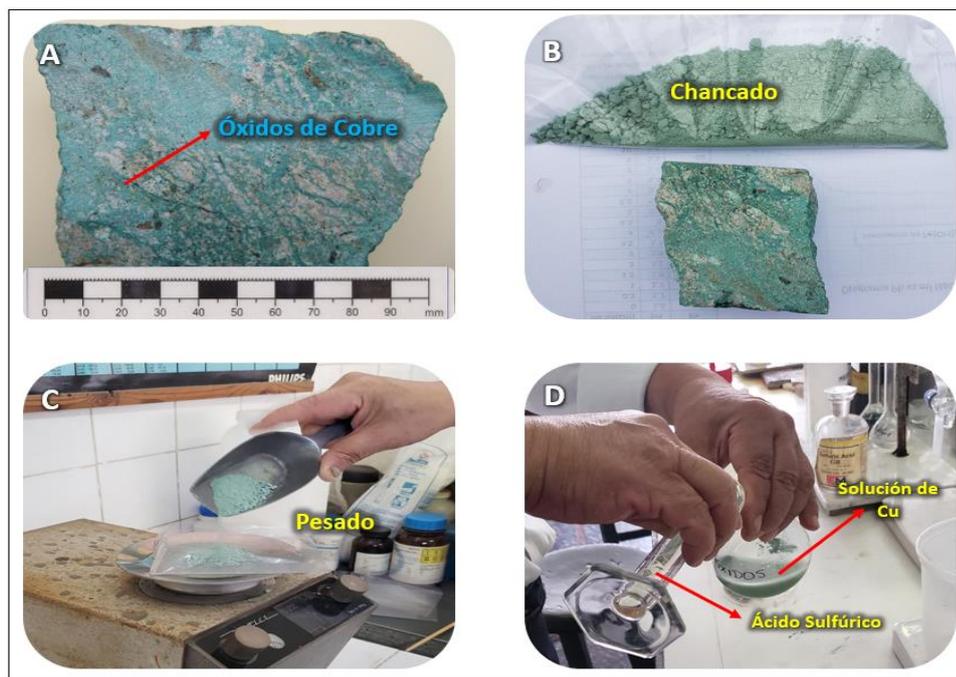


Figura 5,20 Preparación de muestra para solubilización de cobre en ácido sulfúrico. A) Muestra de roca perteneciente a la zona de óxidos de cobre y con presencia de crisocola y brocantita. B) Chancado de muestra de roca hasta pulverizar. C) Pesado de muestra (10 gramos). D) Mezcla de muestra de roca pulverizada con ácido sulfúrico.

* Fuente: Elaboración propia



Figura 5,21 Preparación de muestra para solubilización de cobre en cianuro de sodio. A) Muestra de roca perteneciente a la zona enriquecida con presencia de sulfuros secundarios de cobre (calcosina y covelina). B) Chancado de muestra de roca hasta pulverizar. C) Pesado de muestra (10 gramos). D) Mezcla de muestra de roca pulverizada con cianuro de sodio y diluido con agua destilada.

* Fuente: Elaboración propia

- **Determinación del cobre soluble:** Después de realizar la mezcla de las muestras de rocas pulverizadas con los solventes, se realiza la homogenización y lixiviación de las soluciones utilizando un agitador mecánico por un periodo de tiempo de 45min a 150 revoluciones por minuto (rpm) y temperatura de ambiente, al término de la homogenización se realiza el filtrado de las soluciones utilizando papel filtro, embudo y vaso de precipitado, con lo cual se obtendrá el cobre disuelto o soluble en ácido sulfúrico y el cobre disuelto o soluble en cianuro de sodio en cada vaso de precipitado tal y como se observa en la fotografía B de la figura 5,22. Finalmente, se emplea el método de absorción atómica para determinar la cantidad de cobre soluble (ver figura 5,22).



Figura 5,22 Análisis de solubilidades A) Homogenización de la solución mediante agitación mecánica. B) Filtrado de la solución. C) Equipo de absorción atómica. D) y E) Determinación del contenido de cobre soluble en ácido sulfúrico y cianuro de sodio por el método de absorción atómica.

* Fuente: Elaboración propia

Para determinar el cobre soluble en ácido sulfúrico y cianuro de sodio de una misma muestra, se sigue el siguiente procedimiento:

- Se pesa aproximadamente 10gr de muestra de roca chancada y pulverizada y se transfiere a un matraz de Erlenmeyer, en dicho matraz se adiciona 100ml de ácido sulfúrico diluido al 20%, la mezcla se homogeniza y lixivia mediante un agitador por un periodo de 60min a 120rpm, posterior a ello, se deja en reposo por un tiempo de 60 minutos. Después de tiempo estimado, se realiza la centrifugación por un tiempo de 1min a 2800rpm y se cuantifica el contenido de cobre de la solución mediante el método de absorción atómica, el resultado indicará el cobre soluble en ácido sulfúrico.

- De la solución contenida en el matraz de Erlenmeyer, se desecha el sobrenadante teniendo cuidado de no botar el residuo que queda en el fondo del matraz. A la muestra restante se adiciona 100ml de agua destilada y se agita manualmente para lavar el contenido del sólido presente, esta nueva solución se centrifuga por un tiempo de 1min a 2800rpm, terminado el tiempo se desecha la parte líquida con el cuidado necesario de no botar el residuo sólido. A la muestra sólida en el matraz se adiciona 100ml de solución de cianuro de sodio al 0.5% y con un pH de 10.5, se realiza la lixiviación de la solución con un agitador por el tiempo de 30min a 200rpm, finalmente se centrifuga la solución por el tiempo de 2min a 3000rpm y se cuantifica el contenido de cobre en la solución mediante el método de absorción atómica, lo cual el resultado nos indicará el cobre soluble en cianuro de sodio de la misma muestra analizada.

- El cobre residual se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$CuR = CuT - CuSAC - CuSCn \quad (5.40)$$

Donde:

- CuR: Cobre residual
- CuT: Cobre total.
- CuSAC: Cobre soluble en ácido sulfúrico.
- CuSCn: Cobre soluble en cianuro de sodio.

Con los ensayos experimentales, se obtuvo los resultados del cobre total (CuT) y las solubilidades por ácido sulfúrico (CuSAC) y cianuro de sodio (CuSCn). Con estos datos se ha calculado los índices de solubilidades (ISAC y ISCN) en base a las fórmulas 5.38 y 5.39, adicional a ello, utilizando la ecuación 5.40, también se ha calculado el cobre residual CuR.

En las siguientes tablas 5,7, 5,8, 5,9 y 5,10, se muestran los resultados y cálculos obtenidos.

Tabla 5,7 Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Óxidos de Cobre.

MUESTRA	ALTERACIÓN	MINRALIZACIÓN	CuT	CuSAC	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO
OX-1	Argilica	Óxidos	8.37	8.10	0.22	0.05	96.83%	2.62%	0.55%
OX-2	Argilica	Óxidos	3.11	2.89	0.10	0.13	92.74%	3.18%	4.08%
OX-3	Argilica	Óxidos	2.82	2.55	0.14	0.14	90.22%	4.96%	4.82%
OX-4	Argilica	Óxidos	1.86	1.59	0.12	0.15	85.48%	6.67%	7.85%
OX-5	Argilica	Óxidos	6.43	5.64	0.44	0.35	87.78%	6.82%	5.40%
OX-6	Argilica	Óxidos	2.12	1.76	0.18	0.18	82.75%	8.67%	8.58%
OX-7	Argilica	Óxidos	6.90	5.87	0.73	0.31	85.07%	10.51%	4.42%
OX-8	Argilica	Óxidos	11.95	10.45	1.45	0.05	87.38%	12.16%	0.46%
OX-9	Argilica	Óxidos	1.28	0.89	0.17	0.22	69.51%	13.29%	17.20%
OX-10	Argilica	Óxidos	1.05	0.81	0.15	0.10	76.45%	14.06%	9.50%
OX-11	Argilica	Óxidos	1.32	1.12	0.20	0.00	85.05%	14.95%	0.00%
OX-12	Argilica	Óxidos	1.87	1.46	0.30	0.11	77.89%	16.06%	6.05%
OX-13	Argilica	Óxidos	2.57	1.84	0.55	0.19	71.60%	21.17%	7.23%
OX-14	Argilica	Óxidos	1.94	1.33	0.45	0.17	68.30%	22.99%	8.71%
OX-15	Argilica	Óxidos	2.02	1.38	0.63	0.01	68.42%	31.14%	0.45%
OX-16	Argilica - Filica	Óxidos	2.56	2.25	0.15	0.15	88.04%	6.02%	5.94%
OX-17	Argilica - Filica	Óxidos	5.40	4.58	0.41	0.41	84.79%	7.64%	7.57%
OX-18	Argilica - Filica	Óxidos	4.05	3.56	0.44	0.05	87.93%	10.74%	1.33%
OX-19	Argilica - Filica	Óxidos	1.22	1.03	0.17	0.02	84.51%	13.77%	1.72%
OX-20	Argilica - Filica	Óxidos	1.30	1.00	0.26	0.03	77.14%	20.32%	2.54%
OX-21	Argilica - Filica	Óxidos	2.49	1.53	0.57	0.39	61.38%	23.05%	15.57%
OX-22	Argilica - Filica	Óxidos	3.10	2.13	0.78	0.19	68.71%	25.06%	6.23%
OX-23	Argilica - Filica	Óxidos	2.39	1.69	0.62	0.08	70.67%	26.10%	3.23%
OX-24	Argilica - Filica	Óxidos	2.20	1.45	0.66	0.08	66.15%	30.12%	3.73%

* Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5,8 Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Secundarios.

MUESTRA	ALTERACIÓN	MINRALIZACIÓN	CuT	CuSAc	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO
SS-1	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.80	0.08	0.45	0.27	9.44%	56.37%	34.19%
SS-2	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.69	0.09	0.46	0.14	13.37%	66.74%	19.89%
SS-3	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.68	0.08	0.44	0.16	12.40%	64.46%	23.15%
SS-4	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.96	0.09	0.62	0.25	9.47%	64.54%	25.99%
SS-5	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.74	0.07	0.47	0.20	9.47%	62.99%	27.54%
SS-6	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.56	0.08	0.44	0.04	13.97%	78.36%	7.67%
SS-7	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.73	0.08	0.57	0.09	11.30%	76.93%	11.76%
SS-8	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.40	0.05	0.31	0.04	12.78%	78.27%	8.96%
SS-9	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.38	0.05	0.26	0.07	12.87%	68.21%	18.92%
SS-10	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.41	0.04	0.34	0.04	8.98%	82.28%	8.74%
SS-11	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.33	0.04	0.21	0.08	12.23%	63.69%	24.08%
SS-12	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.50	0.06	0.40	0.03	12.26%	81.01%	6.73%
SS-13	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.38	0.06	0.31	0.02	14.80%	80.68%	4.53%
SS-14	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.30	0.06	0.23	0.01	18.25%	76.97%	4.78%
SS-15	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.52	0.05	0.44	0.03	8.91%	85.80%	5.29%
SS-16	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.25	0.04	0.18	0.03	16.65%	69.70%	13.65%
SS-17	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.42	0.04	0.30	0.08	9.33%	71.17%	19.50%
SS-18	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.67	0.05	0.46	0.15	7.13%	69.72%	23.15%
SS-19	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.79	0.14	0.58	0.07	17.90%	73.37%	8.74%
SS-20	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.65	0.03	0.44	0.18	4.63%	68.06%	27.31%
SS-21	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.82	0.04	0.46	0.32	5.13%	55.99%	38.88%
SS-22	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.37	0.05	0.31	0.02	12.33%	82.25%	5.42%
SS-23	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.47	0.06	0.37	0.04	12.86%	78.79%	8.35%
SS-24	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.43	0.06	0.35	0.03	13.43%	80.79%	5.79%
SS-25	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.34	0.05	0.21	0.09	14.89%	60.16%	24.95%
SS-26	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.48	0.09	0.35	0.05	17.71%	72.50%	9.79%
SS-27	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	0.84	0.11	0.40	0.32	13.51%	47.89%	38.59%
SS-28	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	0.42	0.06	0.16	0.21	13.80%	37.74%	48.47%

* Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5,9 Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Transicional.

MUESTRA	ALTERACIÓN	MINRALIZACIÓN	CuT	CuSAc	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO
ST-1	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	0.37	0.03	0.15	0.19	9.43%	39.89%	50.68%
ST-2	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	0.30	0.05	0.09	0.16	16.72%	28.67%	54.61%
ST-3	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	0.39	0.05	0.12	0.23	11.86%	30.10%	58.04%
ST-4	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	0.89	0.22	0.16	0.51	24.92%	17.73%	57.35%
ST-5	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	1.81	0.46	1.15	0.19	25.48%	63.93%	10.58%
ST-6	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	1.41	0.36	1.02	0.03	25.55%	72.46%	1.99%
ST-7	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.37	0.02	0.09	0.26	5.81%	24.86%	69.32%
ST-8	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.40	0.04	0.12	0.24	9.80%	31.16%	59.05%
ST-9	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.49	0.08	0.20	0.21	16.19%	40.49%	43.32%
ST-10	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.62	0.06	0.30	0.26	9.11%	49.03%	41.85%
ST-11	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.28	0.05	0.11	0.12	19.25%	38.51%	42.24%
ST-12	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.81	0.19	0.12	0.50	23.11%	15.33%	61.56%
ST-13	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.55	0.14	0.26	0.15	25.45%	47.27%	27.27%
ST-14	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.55	0.24	0.19	0.12	43.49%	35.41%	21.10%
ST-15	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	2.87	0.70	1.48	0.69	24.39%	51.57%	24.04%
ST-16	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.55	0.16	0.01	0.38	29.71%	1.45%	68.84%
ST-17	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.59	0.26	0.03	0.30	44.96%	4.44%	50.60%
ST-18	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	1.33	0.52	0.73	0.09	38.71%	54.54%	6.75%
ST-19	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.64	0.02	0.22	0.39	3.85%	34.28%	61.87%
ST-20	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.33	0.02	0.11	0.21	4.52%	31.93%	63.55%
ST-21	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.69	0.04	0.19	0.46	6.07%	26.88%	67.05%
ST-22	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.35	0.01	0.16	0.18	2.82%	46.33%	50.85%
ST-23	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.32	0.04	0.14	0.14	12.29%	44.59%	43.12%
ST-24	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.47	0.02	0.14	0.31	3.86%	29.40%	66.74%
ST-25	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.56	0.20	0.22	0.14	35.71%	39.29%	25.00%
ST-26	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	1.80	0.71	1.01	0.08	39.55%	56.04%	4.40%
ST-27	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.64	0.17	0.08	0.40	25.74%	12.48%	61.78%
ST-28	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.60	0.20	0.06	0.34	33.33%	10.39%	56.28%
ST-29	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	1.68	0.76	0.82	0.10	45.09%	48.84%	6.07%
ST-30	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	2.75	0.65	1.86	0.23	23.77%	67.86%	8.37%
ST-31	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.81	0.24	0.26	0.31	29.63%	32.10%	38.27%
ST-32	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.69	0.22	0.15	0.33	31.12%	21.90%	46.97%
ST-33	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	2.00	0.70	1.16	0.14	34.78%	58.03%	7.19%
ST-34	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	0.69	0.11	0.49	0.10	15.71%	70.61%	13.69%
ST-35	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	0.41	0.07	0.34	0.01	16.14%	82.44%	1.42%

* Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5,10 Cálculo de Índices de Solubilidades para la zona de Sulfuros Primarios.

MUESTRA	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	CuT	CuSAc	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO
SP-1	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	0.30	0.02	0.03	0.25	6.91%	10.19%	82.90%
SP-2	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	0.41	0.01	0.01	0.39	2.53%	2.29%	95.18%
SP-3	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	0.50	0.03	0.04	0.43	6.02%	8.43%	85.54%
SP-4	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	0.58	0.02	0.01	0.55	3.56%	1.39%	95.05%
SP-5	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	0.33	0.01	0.01	0.32	2.26%	2.11%	95.63%
SP-6	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.44	0.03	0.03	0.38	6.16%	7.76%	86.07%
SP-7	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.20	0.01	0.01	0.19	4.80%	2.52%	92.67%
SP-8	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.35	0.03	0.04	0.28	9.43%	10.00%	80.57%
SP-9	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.61	0.01	0.01	0.59	1.64%	0.98%	97.38%
SP-10	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.42	0.01	0.01	0.39	3.45%	2.62%	93.93%
SP-11	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.47	0.02	0.01	0.44	4.37%	1.49%	94.14%
SP-12	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.50	0.02	0.01	0.48	3.39%	1.79%	94.82%
SP-13	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.39	0.01	0.02	0.36	2.85%	4.40%	92.75%
SP-14	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	0.33	0.01	0.01	0.31	3.51%	3.35%	93.14%
SP-15	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.30	0.01	0.01	0.28	3.00%	3.67%	93.33%
SP-16	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	1.16	0.02	0.06	1.08	1.80%	5.47%	92.73%
SP-17	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.25	0.01	0.03	0.22	2.38%	10.32%	87.30%
SP-18	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.25	0.01	0.02	0.22	4.46%	7.61%	87.93%
SP-19	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.84	0.01	0.03	0.79	1.75%	3.77%	94.48%
SP-20	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.35	0.01	0.01	0.33	2.40%	3.67%	93.93%
SP-21	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.27	0.01	0.01	0.25	1.94%	3.38%	94.68%
SP-22	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.28	0.01	0.01	0.26	3.43%	3.79%	92.79%
SP-23	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.28	0.01	0.01	0.27	1.77%	3.90%	94.33%
SP-24	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	0.26	0.01	0.01	0.24	2.31%	4.23%	93.46%
SP-25	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.22	0.02	0.02	0.18	9.80%	9.03%	81.16%
SP-26	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.26	0.03	0.02	0.22	10.26%	7.81%	81.93%
SP-27	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.28	0.03	0.02	0.23	9.55%	7.43%	83.02%
SP-28	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.23	0.01	0.00	0.22	2.17%	1.74%	96.09%
SP-29	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.33	0.03	0.04	0.27	7.67%	11.04%	81.29%
SP-30	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.28	0.02	0.03	0.23	7.92%	11.84%	80.24%
SP-31	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	0.32	0.02	0.04	0.26	6.52%	12.28%	81.20%
SP-32	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	0.37	0.02	0.04	0.31	6.49%	11.08%	82.43%
SP-33	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	0.50	0.01	0.02	0.48	1.67%	3.26%	95.07%
SP-34	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	0.44	0.02	0.01	0.40	5.50%	2.95%	91.54%
SP-35	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	0.40	0.01	0.03	0.36	3.22%	7.43%	89.36%
SP-36	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.39	0.02	0.01	0.37	3.85%	2.05%	94.10%
SP-37	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.38	0.02	0.02	0.34	4.08%	5.79%	90.13%
SP-38	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.27	0.01	0.03	0.23	3.73%	11.57%	84.70%
SP-39	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.36	0.01	0.04	0.31	3.87%	11.33%	84.81%
SP-40	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.53	0.03	0.03	0.47	4.73%	5.68%	89.58%
SP-41	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.40	0.01	0.03	0.35	3.73%	7.30%	88.97%
SP-42	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.28	0.01	0.02	0.26	3.13%	5.56%	91.31%
SP-43	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.30	0.01	0.02	0.27	3.48%	7.15%	89.38%
SP-44	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	0.76	0.02	0.16	0.58	2.57%	21.24%	76.19%

* Fuente: Elaboración Propia

5.2.9.2 Solubilidad de minerales de cobre

Analizando las tablas 5,5 y 5,6, en la tabla 5,11 se correlacionan y se unifican los valores de solubilidades estudiadas por cada autor para los minerales económicos de cobre, de los cuales se establecen los campos mínimos y máximos a la cual es soluble un mineral de cobre comparando los índices de solubilidades en ácido sulfúrico y en cianuro de sodio, tal y como se muestra en la figura 5,23.

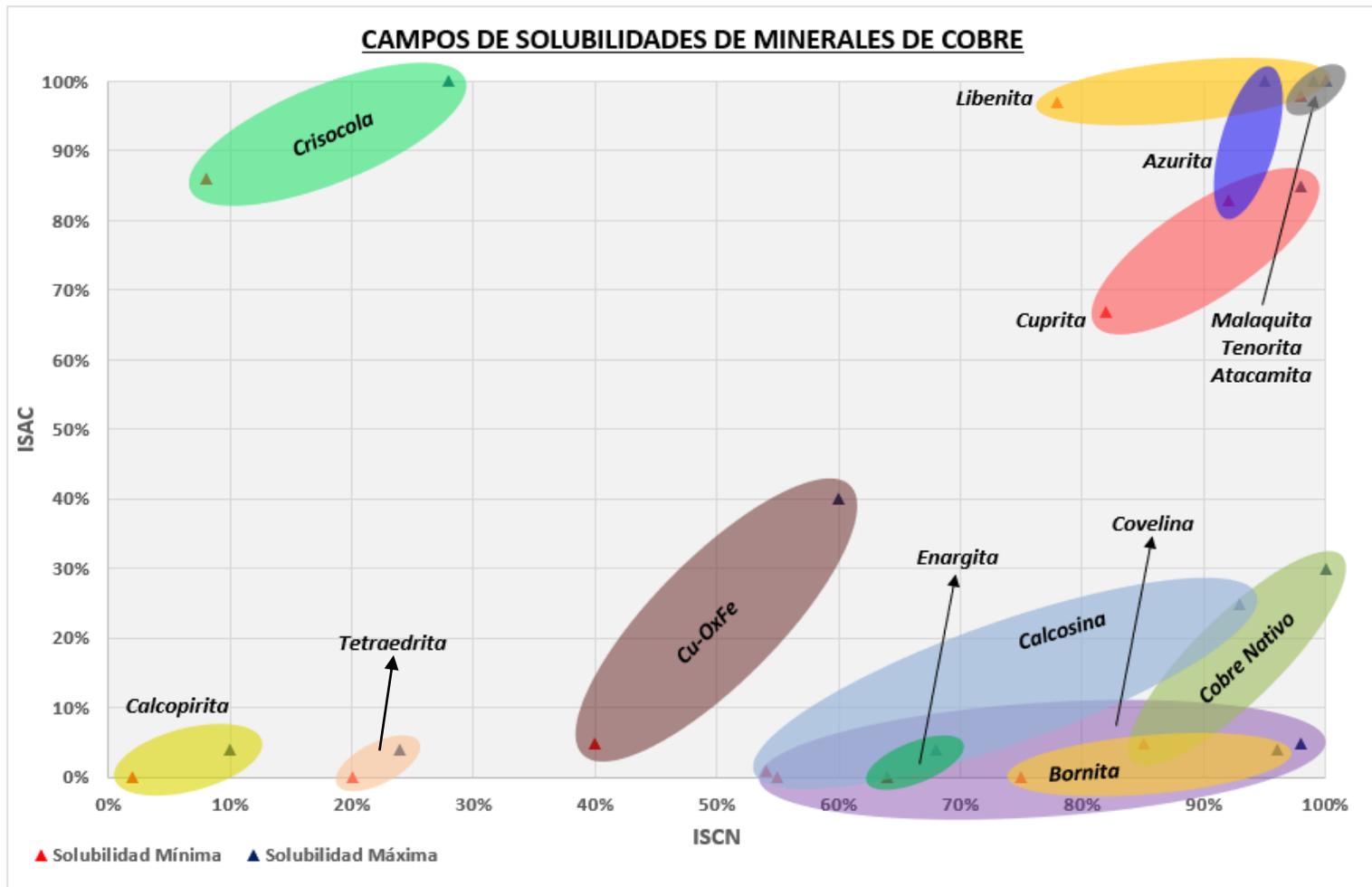


Figura 5,23 Campos de solubilidades de los minerales económicos de cobre en función de sus índices de solubilidad en ácido sulfúrico (ISAC) y cianuro de sodio (ISCN).

*Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de la tabla 5,11.

Tabla 5,11 Índices mínimos y máximos de solubilidades de los minerales económicos de cobre por Cianuro de Sodio y Ácido Sulfúrico.

MINERALES DE COBRE ECONÓMICOS		ISCN		ISAC	
Nombre	Fórmula	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	92%	95%	83%	100%
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	08%	28%	86%	100%
Cobre Nativo	Cu	85%	100%	05%	30%
Cuprita	Cu_2O	82%	98%	67%	85%
Malaquita	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})$	98%	100%	98%	100%
Tenorita	CuO	98%	100%	98%	100%
Brocantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	-	-	98%	100%
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	98%	100%	98%	100%
Covelina	CuS	55%	98%	00%	05%
Calcosina	Cu_2S	54%	93%	01%	25%
Bornita	Cu_5FeS_4	75%	96%	00%	04%
Calcopirita	CuFeS_2	02%	10%	00%	04%
Óxidos de Hierro Cupríferos	Goetita/Limonita	40%	60%	05%	40%
Enargita	Cu_3AsS_4	64%	68%	00%	04%
Tetraedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	20%	24%	00%	04%
Libenita	$\text{Cu}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$	78%	99%	97%	100%

* Fuente: Elaboración Propia. Datos tomados de "The Sequential Copper Analysis Method- Geological, Mineralogical, and Metallurgical Implications", Parkinson y Bhappu, 1995, y "Mineralogical Analysis – Laboratory of Newmont Company", Orlich G., 2001.

Para los yacimientos tipo pórfido de cobre en el sur del Perú y de acuerdo con el perfil de mineralización como se muestra en la figura 5,18, se consideran los campos de estudio de solubilidades de los minerales económicos para este tipo de yacimiento, los cuales son; crisocola – cuprita – tenorita – malaquita -atacamita - azurita (óxidos de cobre – zona oxidada), calcosina - covelina (sulfuros secundarios – zona enriquecida) y calcopirita - bornita (sulfuros primarios – zona hipógena), sin embargo, existen zonas con mineralización mixta, llamado también zona de sulfuros transicionales, que están compuestos por minerales que componen dos zonas distintas de mineralización bajo las mismas condiciones, tal y como se muestra en la figura 5,24.

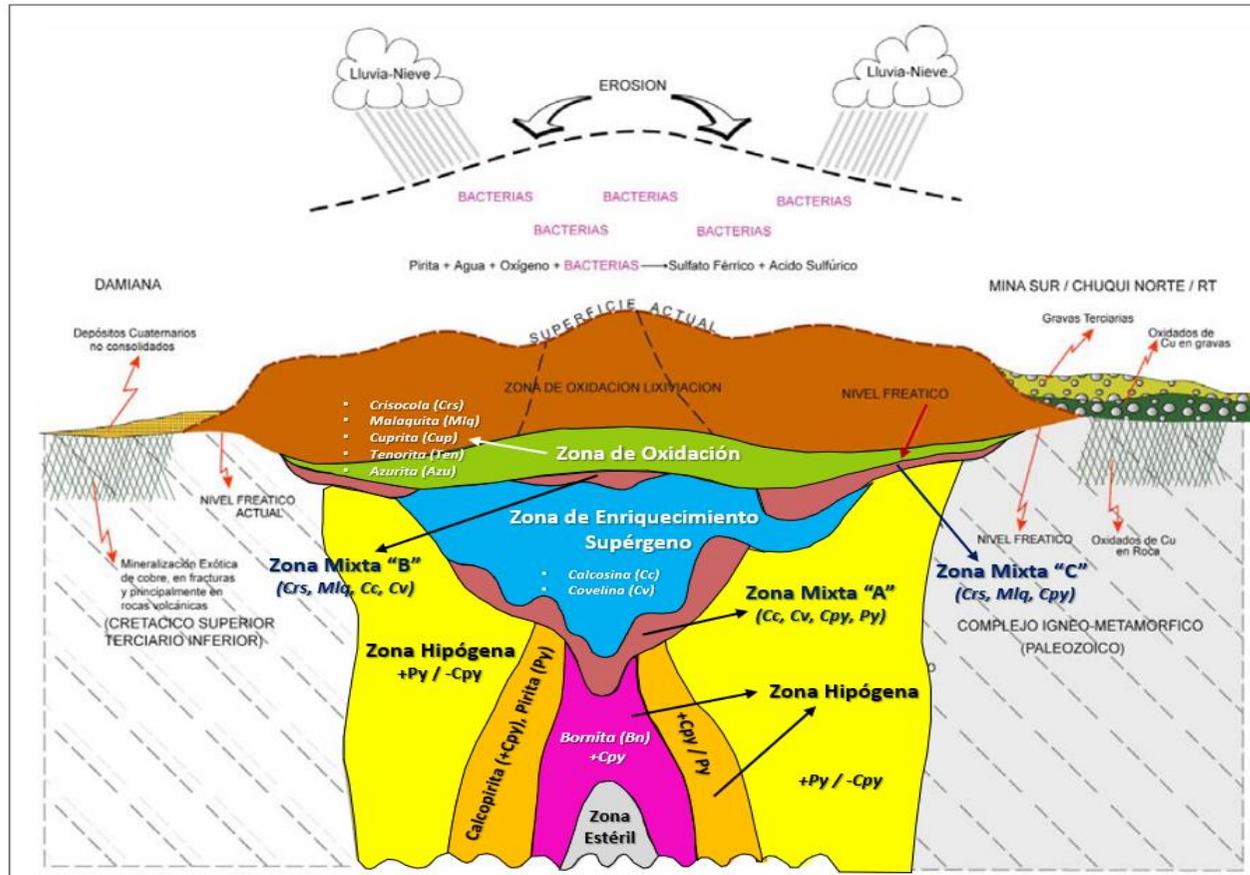


Figura 5,24 Perfil característico de mineralización de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre mostrando la Zona de Oxidación, Zona de Enriquecimiento Supérgeno, Zona Hipógena y Zona Mixta "A" (zona transicional entre minerales de enriquecimiento supérgeno y minerales primarios), Zona Mixta "B" (zona transicional entre minerales óxidos de cobre y minerales secundarios) y Zona Mixta C (zona transicional entre minerales óxidos de cobre y minerales primarios).

*Fuente: Elaboración propia. Modificado de "Mineralogía magnética y paleomagnetismo en los megayacimientos tipo pórfido cuprífero Chuquicamata y El Teniente, Chile", Townley, B. y Astudillo, N. (2008).

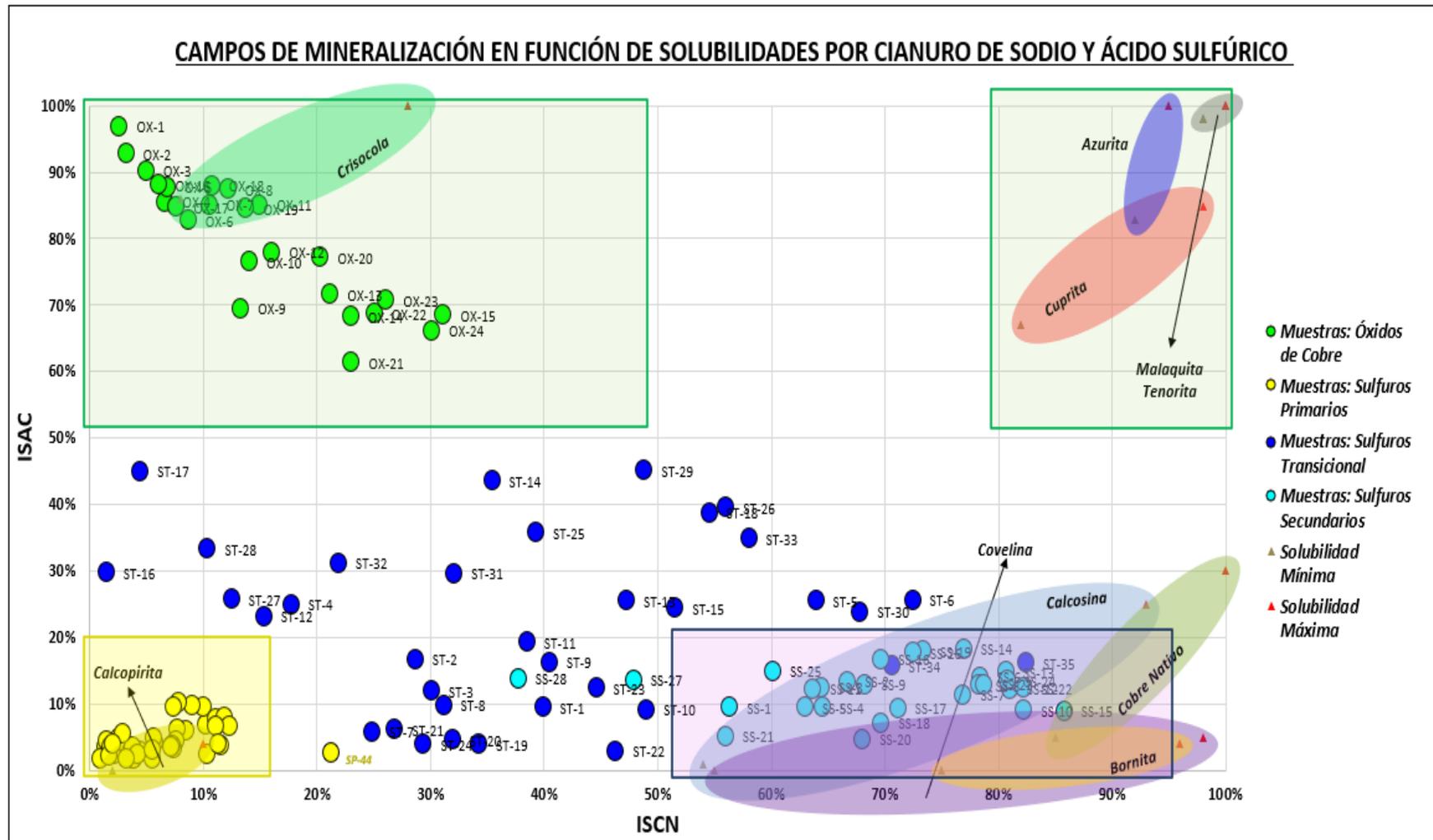


Figura 5,25 Resultados y análisis de muestras por solubilidades en cianuro de sodio y ácido sulfúrico.

*Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados del análisis de cobre secuencial de las muestras analizadas como se observan en las tablas 5,7, 5,8, 5,9, 5,10 y tomando como referencia la figura 5,23, se correlacionaron dichos valores en un gráfico de dispersión en base a la mineralización macroscópica descrita para cada una de ellas, como se observa en la figura 5,25.

Basándose en la descripción mineralógica y macroscópica de las muestras y, mediante los rangos de solubilidades para cada mineral, se identifica en la figura 5,25 la existencia de 3 zonas distintas con concentraciones de datos, enmarcados en colores verde, amarillo y rojo, los cuales, por la mineralización identificada macroscópicamente de cada muestra y valores de solubilidades, se relacionan con la zona de óxidos, zona de sulfuros primarios y zona de sulfuros secundarios respectivamente. Las muestras ploteadas como puntos de color azul en la figura 5,25, corresponde a la zona de sulfuros transicional en base a la descripción mineralógica macroscópica, por lo que guarda correlación con la zona de mixtos al encontrarse entre dos zonas con distinta mineralización, como se explica también en la figura 5,24.

En la figura 5,26, se aprecia los valores establecidos para los índices de solubilidad por cianuro de sodio (ISCN) y ácido sulfúrico (ISAC), los cuales delimitan 4 zonas principales de mineralización para un yacimiento tipo pórfido de cobre. En base a la figura 5,26, se elabora un cuadro de mineralización, conocido también como “Ore Type”, donde se determinan los valores propuestos para definir y caracterizar los tipos de mineralización (zonas mineralizadas) de un yacimiento tipo pórfido de cobre, en base a los valores de los índices de solubilidad por cianuro de sodio y ácido sulfúrico para cualquier muestra analizada (ver tabla 5,12).

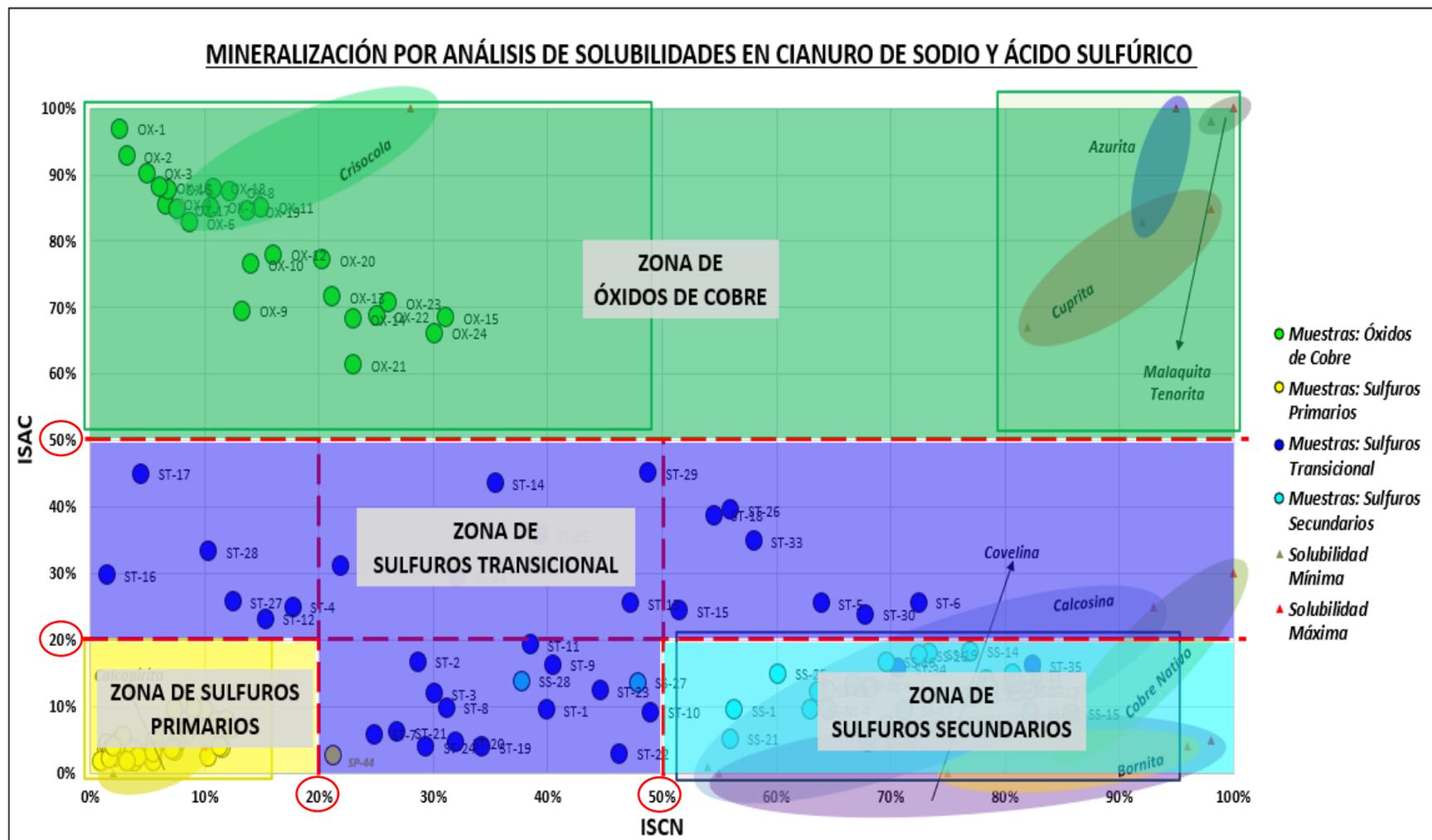


Figura 5,26 Campos y valores establecidos para mineralización de cobre en función de índices de solubilidad en cianuro de sodio y ácido sulfúrico.

*Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los análisis de cobre secuencial de las muestras analizadas y en base a la figura 5,26, se plantea la siguiente tabla para definir la mineralización para un yacimiento tipo pórfido de cobre.

Tabla 5,12 Tipificación de la Mineralización para un Yacimiento tipo Pórfido de Cobre en base a análisis de cobre secuencial.

				Código
$CuT \geq Cut - off$	$0 \leq ISAC < 20$	$0 \leq ISCN < 20$	SULFUROS PRIMARIOS	04
		$20 \leq ISCN < 50$	SULFUROS TRANSICIONAL	03
		$50 \leq ISCN \leq 100$	SULFUROS SECUNDARIOS	02
	$20 \leq ISAC < 50$	SULFUROS TRANSICIONAL		03
	$50 \leq ISAC \leq 100$	ÓXIDOS DE COBRE		01
$CuT < Cut - off$	DESMONTE			05

* Fuente: Elaboración Propia.

Según la tabla propuesta, tener en cuenta que el cut-off o ley de corte, es el grado o ley mínima de cobre para que el mineral pueda ser extraído o procesado económicamente, este valor es independiente y por lo general único para las unidades mineras.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Desarrollo de los procesos hidrotermales relacionados a un yacimiento tipo pórfido de cobre

De la síntesis de la información recolectada y analizada, enfocados principalmente en la descripción de los procesos hidrotermales de alteración y mineralización para los yacimientos tipo pórfido de cobre, se definen e identifican distintas fases hidrotermales siguiendo un orden cronológico de formación, los cuales en el desarrollo de estas dan origen a las distintas alteraciones y mineralizaciones.

Para obtener un mejor enfoque, se recolectó y desarrolló las principales reacciones químicas para cada etapa hidrotermal en la formación de los yacimientos porfiríticos, los cuales comprenden; la fase progradada, fase retrogradada, fase hidrotermal y fase supérgena; mediante estas reacciones químicas, se conoce la formación de los minerales de alteración a partir de la interacción de los fluidos hidrotermales con los

minerales formados de roca y, la interacción de estos con aguas meteóricas en los niveles más superficiales, todo ello sustentado con las ecuaciones en el punto 5.2.2.2. Adicional a ello, las ecuaciones en el punto 5.2.2.3, respaldan los procesos de formación que dan origen a la mineralización económica de cobre (minerales menas) en el yacimiento.

De lo explicado anteriormente, se refuerza y afirma el modelo de pórfidos en la figura 5,16 y el zonamiento de mineralización de la figura 5,18.

6.2 Relación de los parámetros de clasificación establecidos para la mineralización con el análisis de cobre secuencial

Del análisis de cobre secuencial, se determinaron los parámetros de clasificación para un zonamiento de mineralización en base a las solubilidades de los minerales económicos de cobre en cianuro de sodio y ácido sulfúrico, contemplado en la figura 5,26 y tabla 5,12. Sin embargo, según la descripción geológica macroscópica del tipo de mineralización de las muestras recolectadas como se observan en las tablas 5,1, 5,2, 5,3 y 5,4, se observa en la figura 5,25 que existen cinco valores (SP-44, SS-28, SS-27, ST-34 y ST-35) que no guardan relación entre el tipo de mineralización propuesto por solubilidades (Ore Type) y la caracterización visual realizada, lo cual se discute los parámetros propuestos para el zonamiento de mineralización. En consecuencia, se analizó parte de las muestras por caracterización Qemscan para determinar cuantitativamente los minerales de cobre presentes en dichas muestras (ver tabla 6,1), con el propósito de confirmar a que zona de mineralización corresponden cada muestra según los minerales de cobre económicos y además de su cantidad presente.

Tabla 6,1 Análisis Qemscan de muestras contempladas. Calcopirita (Cpy), Calcosina (Cc), Covelina (Cv), Bornita (Bn), Tetraedrita (Tetra), Enargita (Enarg), Cobre-micas (Cu/Micas).

MUESTRA	MINERALIZACIÓN MACROSCÓPICA	ANÁLISIS SECUENCIAL DE COBRE							ANÁLISIS QEMSCAN								
		CuT	CuSAc	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO	ORE TYPE	Cpy	Cc	Cv	Bn	Tetra	Enarg	Cu/Micas	Other (Cu)
SP-44	SULFUROS PRIMARIOS	0.76	0.02	0.16	0.58	2.57%	21.24%	76.19%	SULF. TRANSICIONAL	0.36	0.17	0.02	0.04	-	0.20	-	-
SS-27	SULFUROS SECUNDARIOS	0.84	0.11	0.40	0.32	13.51%	47.89%	38.59%	SULF. TRANSICIONAL	0.29	0.34	0.17	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02
SS-28	SULFUROS SECUNDARIOS	0.42	0.06	0.16	0.21	13.80%	37.74%	48.47%	SULF. TRANSICIONAL	0.19	0.20	0.03	0.06	-	-	-	-
ST-34	SULFUROS TRANSICIONAL	0.69	0.11	0.49	0.10	15.71%	70.61%	13.69%	SULF. SECUNDARIOS	0.12	0.49	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
ST-35	SULFUROS TRANSICIONAL	0.41	0.07	0.34	0.01	16.14%	82.44%	1.42%	SULF. SECUNDARIOS	0.03	0.32	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00

* Fuente: Elaboración Propia.

Según la tabla 6,1, se observa la composición cuantitativa de los minerales de cobre presentes en cada muestra. Para la muestra “SP-44” que corresponde a sulfuros primarios según la caracterización macroscópica, se determina que está compuesto principalmente por calcopirita (Cpy) y calcosina (Cc), lo que demuestra que pertenece a la zona de sulfuros transicional. Para las muestras “SS-27” y “SS-28” que corresponden a sulfuros secundarios según la caracterización macroscópica, se determina que están compuestos principalmente por Cpy, Cc y covelina (Cv), demostrando que corresponden a la zona de sulfuros transicionales. Para las muestras “ST-34” y “ST-35” que corresponden a sulfuros transicionales según la caracterización macroscópica, se observa que están compuestos principalmente por Cc, lo que demuestra que pertenecen a la zona de sulfuros secundarios.

Por lo tanto, las cinco muestras contempladas se encuentran dentro de la clasificación según las zonas mineralizadas como se observa en la figura 5,26, lo que demuestra y corrobora los parámetros establecidos para la caracterización de la mineralización. Adicional a ello, se analizaron muestras aleatorias por Qemscan como se observa en el anexo 3, determinando que cada muestra se encuentra dentro de sus zonas de mineralización establecidas (Ore Type), lo que nos permite reafirmar los parámetros

establecidos para un zonamiento eficaz de mineralización aplicado a los yacimientos tipos pórfido de cobre en función del análisis de sus solubilidades.

6.3 Zonamiento de la mineralización en base a la interpretación geológica de secciones

Según los parámetros para la clasificación de la mineralización para los yacimientos tipo pórfido de cobre, se aplicó este método a muestras de sondajes de perforación diamantina (DDH) de la Unidad Minera “Cobre Sur”. Para lo cual, se realizó perfiles de la interpretación geológica de la mineralización en las secciones A-A’ y B-B’ como se observan en las figuras 6,2 y 6,4, utilizando la codificación de mineralización de los sondajes de perforación diamantina de acuerdo con los valores de la tabla 5,12; con la finalidad de comparar con el modelo de mineralización que usa actualmente la unidad minera (ver figuras 6,1 y 6,3) realizado en base a la información del logueo geológico que es una descripción visual y macroscópica a muestras de roca.

Como se observa en las de las secciones A-A’ (figuras 6,1 y 6,2) y B-B’ (figuras 6,3 y 6,4), se aprecia diferencias importantes en las zonas enmarcadas en color rojo, de los cuales los más prescindibles son; las diferencias de codificación por tipo de mineralización de los sondajes de perforación diamantina (DDH) y el zonamiento de la mineralización a partir de la interpretación geológica.

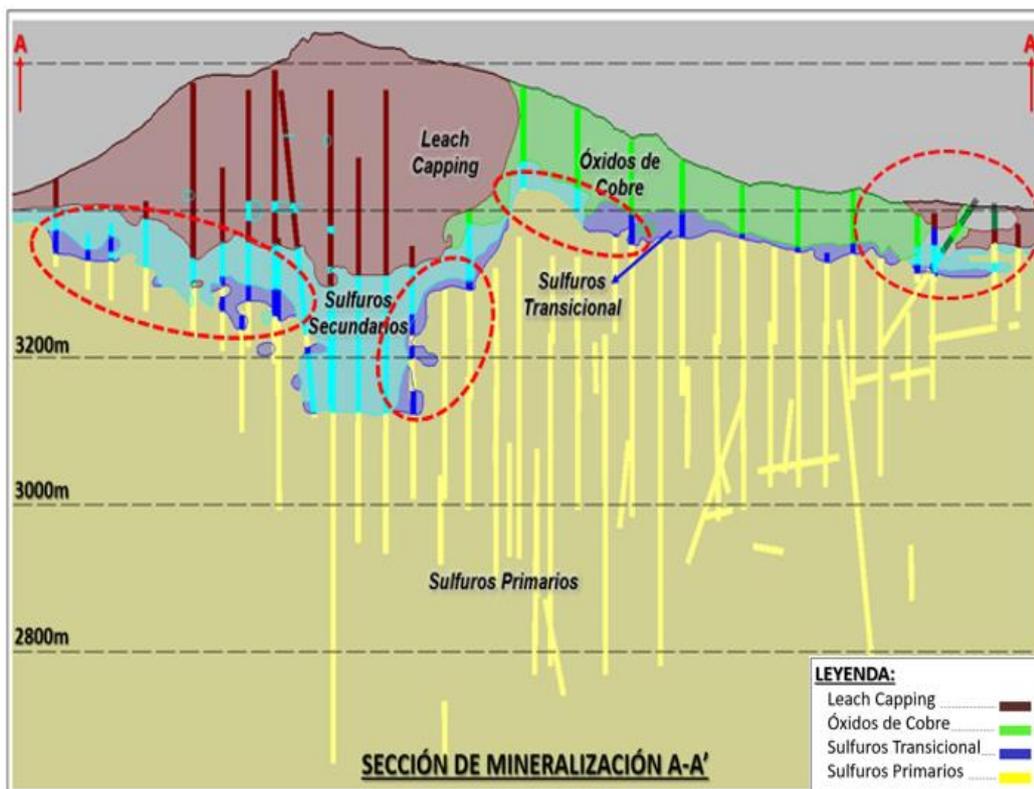


Figura 6,1 Sección A-A' - Modelo de mineralización usado actualmente en la “Unidad Minera Cobre Sur”, realizado con datos de logeo geológico.
 * Fuente: Elaboración propia

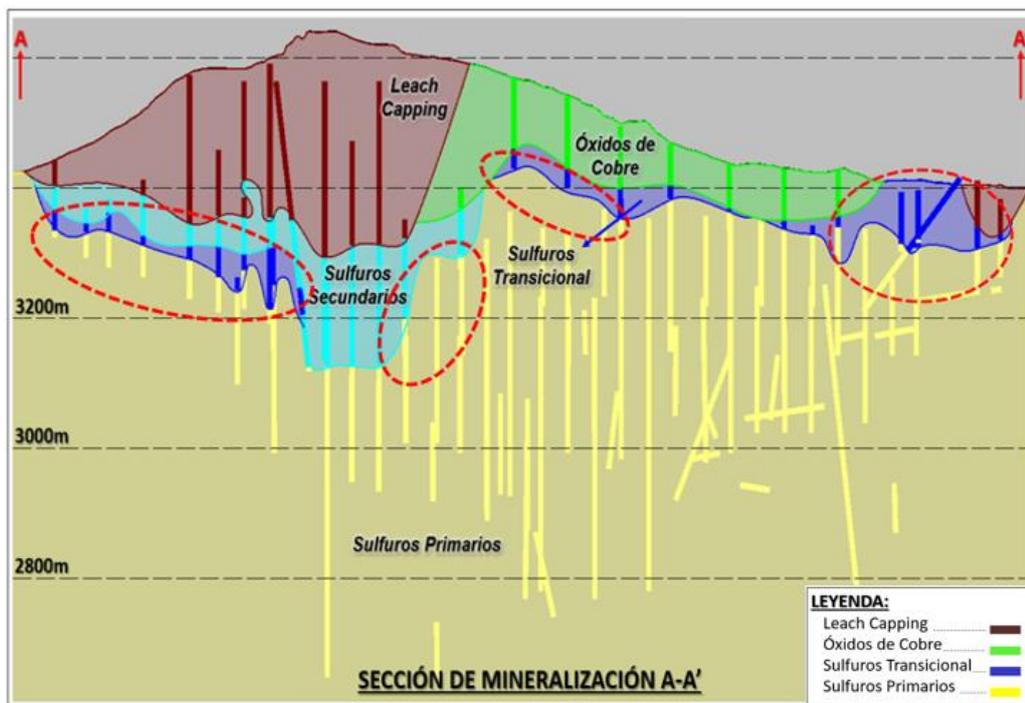


Figura 6,2 Sección A-A' - Modelo de mineralización basado en los datos de codificación de los sondajes de perforación diamantina utilizando los parámetros de la tabla 5,12.
 * Fuente: Elaboración propia.

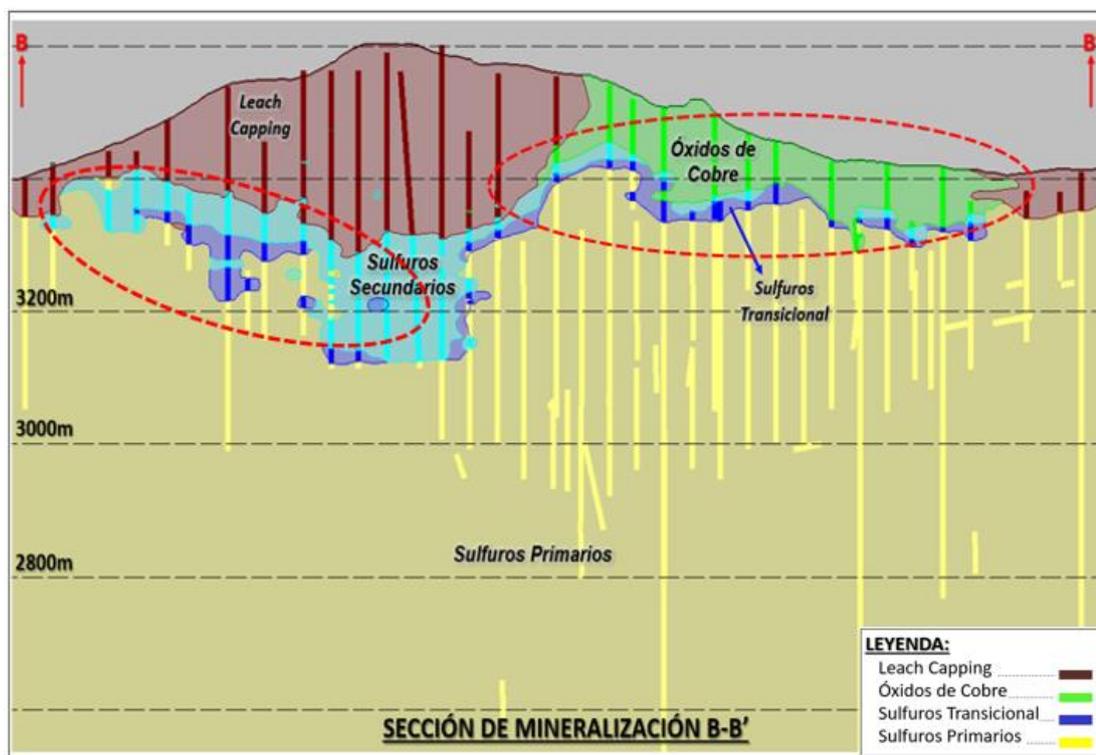


Figura 6,3 Sección B-B' - Modelo de mineralización usado actualmente en la "Unidad Minera Cobre Sur", realizado con datos de logeo geológico.

* Fuente: Elaboración propia

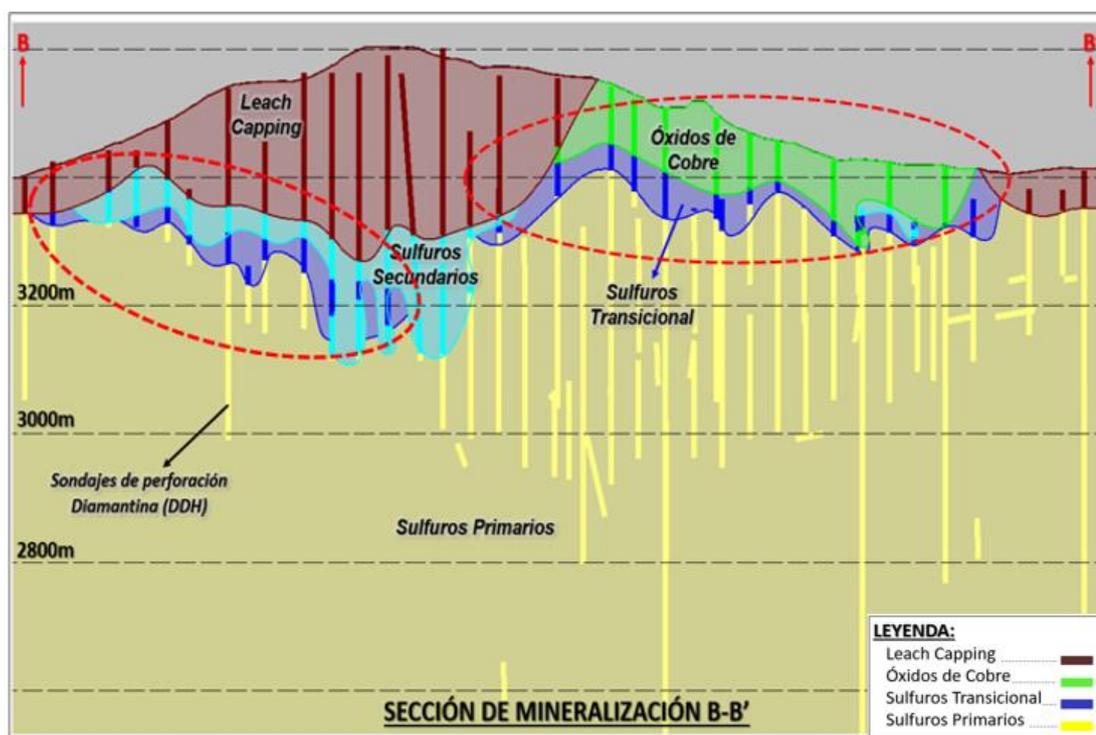


Figura 6,4 Sección B-B' - Modelo de mineralización basado en los datos de codificación de los sondajes de perforación diamantina utilizando los parámetros de la tabla 5,12.

* Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto; teniendo como referencia las figuras 6,2 y 6,4, que corresponden a perfiles de mineralización realizados mediante la interpretación geológica en base a los parámetros de solubilidades en ácido sulfúrico y cianuro de sodio (ver tabla 5,12) y, basándose en las figuras 5,18 y 5,24 correspondientes a perfiles característicos de mineralización para los yacimientos tipo pórfido de cobre, se obtiene una zonificación más eficaz de la mineralización en comparación con las figuras 6,1 y 6,3.

6.4 Implicancia del zonamiento de mineralización en la recuperación del cobre

Respecto al tratamiento metalúrgico para la recuperación del cobre, esta se basa principalmente en distintos destinos del material de roca minado y clasificados por tipo de material, que provienen de la operación minera por los procesos de voladura y acarreo tal y como se muestra en un ejemplo plasmado en la tabla 6,2.

Tabla 6,2 Tabla de Tipo de Material y Destinos a la que son enviados el material minado proveniente de la operación minera, en base al Cutoff, Mineralización (SP: sulfuros primarios, SS: sulfuros secundarios, ST: sulfuros transicionales, OX: óxidos de cobre), Alteración (K-S; potásica, F: fílica, AI: Argílica Intermedia, A: argílica) y otros parámetros descritos en las restricciones.

TIPO DE MATERIAL	DESTINO	Cutoff	MINERALIZACIÓN	ALTERACIÓN	RESTRICCIONES
Mineral para stock	Stock de baja ley	0.25	SP, SS, ST	K-S, F, AI	Arcillas totales<5%
Mineral	Chancado - Planta	0.35	SP, SS	K-S, F, AI	Arcillas totales<5%
Lixiviable para proceso		0.50	OX, ST	A, F, AI	OxCu<25% y Arcillas totales<5%
Lixiviable de alta ley	Pads - Hidrometalurgia	0.40	OX, ST	A, F, AI	Arcillas totales<6.5%
Lixiviable de baja ley	Pads - Resto de mina	0.20	OX, ST	A, F, AI	4 meses de irrigación
Desmonte	Botaderos	<0.20	Cualquiera	Cualquiera	-

* Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la clasificación por destinos de acuerdo el tipo de material explotado y económico (ver tabla 6,2), se elige el correcto método de tratamiento metalúrgico a utilizar, los cuales están comprendidos por flotación (stock de baja ley, chancado-planta) y lixiviación (pads-hidrometalurgia, pads-resto de mina).

Según la tabla 6,2, los destinos a la cual va el material minado para su tratamiento metalúrgico están en función de varios parámetros y restricciones, siendo la mineralización y alteración muy determinantes al momento de clasificar el tipo de material, por lo tanto, es importante que los modelos geológicos de alteración y mineralización estén bien establecidos, y con ello, definir mediante el destino el método más adecuado para recuperar la mayor cantidad de cobre.

Finalmente, en cuanto a las figuras 6,1 y 6,3, se observa que en las zonas enmarcadas en líneas rojas parte del material sería enviado a destinos erróneos, ya que están siendo clasificados e interpretados por otros tipos de mineralización que no les corresponde, por lo que el sustento de la hipótesis es positiva, confirmando que un zonamiento geológico eficaz de la mineralización mediante el estudio de las solubilidades (ver figuras 6,2 y 6,4), mejoraría el grado de recuperación de cobre, ya que es un factor muy determinante en lo clasificación de destinos de material minado.

CONCLUSIONES

- Según los rasgos geológicos y tectónicos en la región sur del Perú, para la ocurrencia y formación de un yacimiento tipo pórfido de cobre, es necesario la ocurrencia de tres eventos fundamentales, los cuales son; el equilibrio tectónico con una velocidad constante por más de 10 Ma, las condiciones de magma – asimilación – segregación y homogenización (MASH) asociados al límite entre corteza – manto y, un sistema de fallas configurando zonas de debilidad por donde pueda ascender el magma.
- Eventos magmáticos que forman grandes depósitos de minerales de cobre de baja ley y gran tonelaje (yacimientos porfiríticos), se encuentran dispersos y distribuidos a lo largo del corredor andino del Sistema de Fallas Incapuquio en dirección NW-SE, los cuales pertenecen a la franja metalogénica de la época del Paleoceno Medio.
- La caracterización de los procesos hidrotermales mediante sus reacciones químicas descritas en este apartado, proporciona una fuente de información más confiable y detallada para la caracterización de los tipos de alteración y mineralización, lo que mejora la conceptualización de los yacimientos porfiríticos al realizar los modelos geológicos, que son base fundamental para la estimación de recursos y reservas.

- El método de análisis de cobre secuencial es una técnica eficaz que determina con bastante precisión el zonamiento de la mineralización para yacimientos tipo pórfido de cobre, basándose en las solubilidades por cianuro de sodio y ácido sulfúrico.
- Según el planteamiento del esquema de clasificación mineralógica basado en los resultados de cobre soluble, se determinaron los parámetros que definen zonas de mineralización de cobre, no obstante, el método metalúrgico y sus materiales e insumos a utilizar para la recuperación de cobre parte en todo momento del modelo geológico de mineralización, por lo que el zonamiento eficaz de este modelo en base al estudio de sus solubilidades, generará mayor recuperación de cobre en los procesos de flotación y lixiviación.
- De las muestras analizadas, se diferencian con mayor facilidad a los minerales óxidos de cobre, y estos a su vez abarcan un amplio rango de valores definidos únicamente por la solubilidad de la muestra en ácido sulfúrico ($ISAC \geq 50\%$).
- Con el método de análisis de cobre secuencial, la mineralización primaria está determinada únicamente por la calcopirita, siendo este mineral el que representa más del 85% del contenido de cobre del yacimiento.
- Las zonas transicionales pueden ser identificadas y estimadas macroscópicamente con facilidad mediante una caracterización visual cuando la muestra contiene leyes considerables de cobre, en contraste, cuando

contiene leyes bajas de cobre se dificulta la identificación de los minerales de cobre y por lo tanto la estimación aproximada, por lo que el método de análisis de cobre secuencial zonifica con mucha eficacia estas zonas de transición bajo los parámetros establecidos.

- La aplicación del método de análisis de cobre secuencial empleado para cualquier tipo de muestra de roca, permite obtener datos de solubilidades para el desarrollo del zonamiento mineralógico del yacimiento, lo cual define sus componentes de cobre lixiviables e insolubles. Posteriormente, estos valores pueden integrarse como una variable adicional en el proceso del modelamiento geológico y estimación, lo cual favorecerá en la elección del proceso metalúrgico más adecuado a utilizar y con ello incrementar el porcentaje de recuperación para cada zona mineralizada hasta en un 5%.
- El método de análisis de cobre secuencial no presenta problemas técnicos importantes al ser un método simple de análisis, ya que no emplea numerosos insumos ni tediosos procedimientos, puede ser implementando sin problemas por la mayoría de los laboratorios de análisis comerciales o de las unidades mineras, adicional a ello, sobre la base de la producción en un laboratorio a escala comercial, los costos estimados son de aproximadamente \$20 (dólares) por cada muestra, excluyendo los costos de preparación, todo ello, con la finalidad de agregar un dato adicional que contribuya a una mejor caracterización mineralógica de las muestras de rocas.

RECOMENDACIONES

- La importancia de realizar una descripción petrográfica de las muestras antes de ser analizadas y establecer la variedad de las diferentes especies minerales y su distribución general no debe eximirse, por el contrario, debe formar la base al momento de seleccionar las muestras y aplicar el método de análisis secuencial de cobre. Además, el trabajo petrográfico garantiza como parte de la verificación de la eficacia del método analítico.
- Proponer el método de ensayo secuencial de cobre para contribuir en la definición de programas de pruebas metalúrgicas, así como también evaluarlos.
- Aumentar la mayor cantidad de muestras analizadas por solubilidades en ácido sulfúrico y cianuro de sodio al momento de realizar el análisis para el depósito de estudio, con el propósito de una determinación más detallada y/o precisa de los parámetros de clasificación de los tipos de mineralización propuestos.
- Plantear la toma de muestras de mano complementarias a partir de los nuevos parámetros de caracterización mineralógica, con la finalidad de obtener mayores referencias al momento de realizar y definir las distintas zonas mediante la descripción macroscópica o logueo geológico.

- Explorar compuestos químicos que sustituyan al cianuro de sodio, debido a que por la toxicidad al igual que otras sales de cianuro solubles, se debe tener cuidado en la manipulación de este compuesto y utilizar un gran número de elementos de protección personal (EPP) durante la realización de las pruebas a las muestras analizadas.
- Determinar relaciones entre roca-alteración-mineralización a partir de los análisis de solubilidades con el propósito de identificar posibles nuevas asociaciones de zonas que comparten las mismas características y comportamientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, Jorge, Quispe, J., Santisteban, A. y Acosta, Harmuth. (2008). “Épocas Metalogenéticas y Tipos de Yacimientos Metálicos en la Margen Occidental del Sur del Perú: Latitudes 14°S – 18°S”. *Congreso Peruano de Geología (14). Congreso Latinoamericano de Geología (13)*. Lima, Perú.
2. Acosta, H., Alvan, A., Oviedo, M. y Rodriguez, J. (2010). “Actividad Tectónica del Sistema de Fallas Cincha-Lluta Incapuquio Durante la Evolución de la Cuenca Arequipa en el Jurásico”. *Sociedad Geológica del Perú: XV Congreso Peruano de Geología, N°9*, pp. 742-745. Cusco, Perú.
3. Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M. y Rodríguez, J. (2011). “Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca. Hojas 36-v y 36-x. Escala 1:50,000”. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – *INGEMMET, boletín N°139, Serie A: Carta Geológica Nacional*. Lima, Perú.
4. Acosta, J. y Sempere, T. (2017). “Evolución Tectónica y Metalogenética del Perú”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (10). ProExplo 2017. Instituto de Ingenieros de Minas de Perú, Lima, Perú*.
5. Aguirre, L., Levi, B. y Nystrom, J. (1989). “The Link Between Metamorphism, Volcanism and Geotectonic Setting During the Evolution of the Andes”. *Geological Society Special Publication, N°43*, pp. 223-232.

6. Audebaud, E., Capdevila, R., Dalmayrac, B., Debelmas, J., Laubacher, G., Lefevre, C., Marocco, R., Martinez, C., Mattauer, M., Megard, F., Paredes, J. y Tomasi, P. (1973). “Les Traits Géologiques Essentiels del Andes Centrales (Pérou-Bolivie)”. *Revue de Géographie Physique et de Géologique Dynamique*, vol. 15, pp. 73.114.
7. Beane, R. y Titley, S. (1981). “Porphyry Copper Deposits: Part II. Hydrothermal Alteration and Mineralization”. *Society of Economic Geologists (SEG)*, vol. 75, pp. 235-269. *Estados Unidos*.
8. Bellido, E. y Narváez, S. (1960). “Geología del Cuadrángulo de Atico (Hoja 33-o) – [Boletín A2]”. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Boletín N°2*.
9. Bidgood, T. (2000). “Geología del Yacimiento Cerro Negro”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (1). ProExplo (1999). Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, Lima*, pp. 227-230.
10. Boekhout, Flora. (2012). “Geochronological Constraints on the Paleozoic to Early Mesozoic Geodynamic Evolution of Southern Coastal Peru”. *[Tesis doctoral con mención en ciencias de la tierra]. Universidad de Ginebra, Suiza*.
11. Chiaradia, M., Ulianov, A., Kouzmanov, K. y Beate, B. (2012). Why Large Porphyry Cu Deposits Like Gight Sr/Y magmas?. *Scientific Reports*, vol. 2. *Ginebra, Suiza*.
12. Cobbing, Edwin. y Pitcher, Wallace. (1983). “Andean Plutonism in Peru and its Relationship to Volcanism and Segmented Plate Edge”. *Boulder, CO: Geological Society of America*, vol. 159, pp. 277-291.

13. Concha, D. y Valle, J. (1999). “Prospección, Exploración y Desarrollo del Yacimiento de Cuajone”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (1). Instituto de Ingenieros de Minas de Perú, Lima, pp. 117-143.*
14. Condori, Carol (2020). “Evaluación de las Cinéticas de Flotación de Cu de un Mineral Mixto a Partir del Análisis de Cobre Secuencial”. [Tesis de grado para optar el título de ingeniera metalurgista]. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Perú.*
15. Corbett, Greg (2018). “Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration”. *Short Course Manual. Corbett Geological Services Pty Ltd.*
16. Corbett, G. y Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim Gol-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization”. *Littleton, CO: Society of Economic Geologists (SEG), vol. 06. Australia.*
17. Diaz, R. y Bembow, M. (2003). “Caracterización Geometalúrgica de la Zona de Mixtos - Sulfuro Primario – Secundario del Yacimiento Zaldivar, Segunda Región de Antofagasta, Chile”. *Congreso Geológico Chileno (10), Departamento de Ciencias de la Tierra – Universidad de Concepción, Chile.*
18. Evans, A. (1992). “Erzlagerstättenkunde”. *Udo Neumann y Gerburg Larsen. Stuttgart, Alemania.*
19. Gagliuffi, P. y Vera, M. (2018). “Caracterización Petromineralógica de los Yacimiento Toquepala y Cuajone”. *Instituto Geológico, Minero y*

- Metalúrgico – IMGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica, N°49. 206p.*
20. Garritz, A., Gasque, L. y Martínez, A. (2005). “Química Universitaria”. *Pearson Educación. Facultad de Química, Universidad de México, pp. 609-621.*
21. Jenks, William (1948). “Geología de la Hoja de Arequipa al 200,000”. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Boletín del Instituto Geológico del Perú, N°9. Lima, Perú.*
22. John, D., Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., Graybeal, F., Mars, J., McPhee, D., Seal, R., Taylor, R. y Vikre, P. (2010). “Porphyry Copper Deposit Model”. *U.S. Geological Survey, Chapter B of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. Reston, VA.*
23. Loucks, R. (2012). “Chemical Characteristics, Geodynamic Setting, and Petrogenesis of Copper Ore-Forming Arc Magmas”. *Perth, Centre for Exploration Targeting, University of Western Australia, pp. 1-10.*
24. Makshev, V. y Zentilli, M. (1999). “Fission Track Thermochronology of the Domeyko Cordillera, Northern Chile: Implications for Andean Tectonics and Porphyry Copper Metallogenesis”. *Exploration and Mining Geology, vol. 8, N°1 y 2, pp. 65-89. Canada.*
25. Marchena, A. (2019). “Caracterización Petrográfica e Interpretación Litogeoquímica del Magmatismo de los Proyectos Tía María-La Tapada, Los Calatos y Chipispaya (Arequipa-Moquegua-Tacna)”. *[Tesis de*

*grado para obtener título profesional de ingeniero geólogo].
Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.*

26. Martínez, W. y Zuloaga, A. (2000). “Memoria Explicativa de la Geología del Cuadrángulo del Moquegua (35-u) [Escala 1:50 000]”. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Dirección de Geología Regional, serie memoria descriptiva. Lima, Perú.*
27. Martínez, William y Cervantes, John (2003). “Rocas Ígneas en el Sur del Perú. Nuevos Datos Geocronométricos, Geoquímicos y Estructurales Entre los Paralelos 16° y 18°30’ Latitud Sur”. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, boletín N°26, Serie D: Estudios Regionales. Lima, Perú.*
28. Martínez, W., Marchena, A., Otero, J. y León, W. (2017). “Geología y Controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental Sur de Perú”. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET: Dirección de Recursos Minerales y Energéticos – DRME, pp. 73-76. Lima, Perú.*
29. Martínez, W., Marchena, A. y Otero, J. (2019). “Controles Litogeoquímicos en la Mineralización Tipo Pórfido de Cobre en el Sur del Perú”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (11). ProExplo 2019. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, Lima, pp. 36-38.*
30. Mattos, R. y Valle, J. (1999). “Exploración, Geología y Desarrollo del Yacimiento Toquepala”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (1). ProExplo 1999. Instituto de Ingenieros de Minas de Perú, Lima, pp. 101-116.*

31. Mendivil, S. (1965). “Geología de los Cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y) – [Boletín A10]”. *Comisión Carta Geológica Nacional, boletín N°10. Lima, Perú.*
32. Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S. y Titler, A. (1995). “La franja Maricunga: Síntesis de la Evolución del Frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la Zona Sur de los Andes Centrales”. *Revista Geológica de Chile, vol. 21, pp. 273-313.*
33. Mukasa S. (1986). “Zircon U-Pb Ages of Super-Units in the Coastal Batholith, Peru: Implications for Magmatic and Tectonic Processes”. *Geological Society of America Bulletin, pp. 241-254.*
34. Muñoz, M. (2011). “Petrogénesis de Rocas Intrusivas del Yacimiento el Teniente y Evolución del Magmatismo Cenozoico de Chile Central (33°00’-34°30’S)”. [*Tesis doctoral en ciencias con mención en geología*]. *Universidad de Chile.*
35. Noble, D., Farrar, E. y Cobbing, E. (1979a). “The Nazca Group of South-Central Peru: Age, Source and Regional Volcanic and Tectonic Significance”. *Earth & Planetary Science Letters, vol. 45, pp. 80-86.*
36. Orlich, G. (2001). “Mineralogical Analysis – Geo-Metallurgy Laboratory of Newmont Company”. *Cajamarca, Perú.*
37. Ottaway, B. (1994). “Prähistorische Archäometallurgie”. *Marie L. Leidorf, Espelkamp, Alemania.*
38. Pardo, F. y Molnar, P. (1987). “Relative motions of the Nazca (Farallon) and South American Plates Since Late Cretaceous Time: Tectonics”. *Tectonics, vol. 6, N°3, pp. 233-248.*

39. Parkison, G. y Bhappu, R. (1995). The sequential copper analysis method-geological, mineralogical, and metallurgical implications”. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration: Annual Meeting. Denver, Colorado.*
40. Pearce, J. y Peate, D. (1995). “Tectonic implication of the composition of volcanic arc magmas”. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences (23)*, pp. 251-285.
41. Pino, A., Sempere, T., Jacay, J. y Iannuzzi, R. (2002). “Nuevos Aportes Geológicos en el Estudio de la Evolución Geodinámica de la Cordillera de los Andes en el Sur del Perú: Área Mal Paso-Palca (Tacna)”. *Sociedad Geológica del Perú (SGP)*, pp. 233-247.
42. Pitcher, W., Atherton, M., Cobbing, E. y Beckinsale, R. (1985). “Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes”. *Glasgow: Backie & Son; New York: Halsted Press, a division of John Wiley & Sons Inc.*
43. Quang, C., Clark, A., Lee, J. y Guillen, J. (2003). “⁴⁰Ar-³⁹Ar Ages of Hypogene and Supergene Mineralization in the Cerro Verde-Santa Rosa Porphyry Cu-Mo Cluster, Arequipa, Perú”. *Economic Geology (98)*, pp. 1683-1696.
44. Richards, J. (2003). “Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation”. *Economic Geology (98)*, pp. 1515-1533.
45. Rojas, F. (2020). “Modelamiento Geoestadístico de la Lixiviabilidad de un Yacimiento de Cobre”. [Tesis para optar grado de magister en minería]. *Departamento de Ingeniería de Minas - Universidad de Chile.*
46. Sánchez, A. (1983a). “Nuevos datos K-Ar en algunas rocas del Perú”. *Sociedad Geológica del Perú (SGP), Boletín vol. 71*, pp. 193-202.

47. Sánchez, A. y Martínez, W. (2002). “Nuevos Datos Geocronológicos (K/Ar) y Geoquímicos, en Rocas Ígneas Meso-Cenozoicas en la Cordillera de los Andes – Sur del Perú”. *Sociedad Geológica del Perú. Congreso Peruano de Geología (11)*, 49p., Lima, Perú.
48. Seedorff, E., Dilles, J., Proffectt, J., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W., Johnson, D. y Barton, M. (2005). “Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features”. *Economic Geology*, vol. 100, pp. 251-298.
49. Sillitoe, R. H. y McKee, E. (1996). “Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province”. *Economic Geology*, vol. 91, pp. 164-179.
50. Sillitoe, R. H. (2003). “Iron Oxide-Cooper-Gold Deposits: An Andean View”. *Springer, Mineralium Deposita* 38, pp. 787-812.
51. Sillitoe, R. H. (2005). “Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits”. *Society of Economic Geologists (SEG), Economic Geology*, vol. 100, pp. 723-768.
52. Sillitoe, R. H. y Perelló, J. (2005). “Andean Copper Province: Tectonomagmatic, Deposit Types, Metallogeny, Exploration and Discovery”. *Society of Economic Geologists (SEG). Economic Geology (100)*, vol. 2005, pp. 845-890.
53. Sillitoe, R. H. (2010). “Porphyry Copper Systems”. *Society of Economic Geologists, Inc. (SEG), Economic Geology*, vol. 105, pp. 3-41.

54. Sillitoe, R. H. y Mortensen, J. (2010). "Longevity of porphyry copper formation at Quellaveco, Peru". *Economic Geology* (105), pp. 1157-1162.
55. Simmons, Adam. (2013). "Magmatic and Hydrothermal Stratigraphy of Paleocene and Eocene Porphyry Cu-Mo Deposits in Southern Peru". [Tesis doctoral con mención en ciencias geológicas]. *The University of British Columbia, Vancouver*.
56. Singer, D., Berger, V. y Moring, B. (2008). "Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models". *U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey (USGS), file report 2008-1155, version 1.0, 45p*.
57. Stewart, J. (1968). "Rocas Intrusivas del Cuadrángulo de La Joya". *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, boletín N°19. Servicio de Geología y Minería. Lima, Perú*.
58. Tatsumi, Y., Hamilton, D. y Nesbitt, R. (1986). "Chemical Characteristics of Fluid Phase Released from a Subducted Lithosphere and the Origin of Arc Magmas: Evidence from High Pressure Experiments and Natural Rocks". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (29), pp. 293-309.
59. Tosdal, R., Farrar, E. y Clark, A. (1981). "K-Ar Geochronology of the Late Cenozoic Volcanic Rocks of the Cordillera Occidental, Southernmost Peru". *Department of Geological Sciences. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 10, pp. 157-173*.

60. Townley, B. y Astudillo, N. (2008). “Mineralogía Magnética y Paleomagnetismo en los Megayacimientos Tipo Pórfido Cuprífero Chiquicamata y El Teniente, Chile”. *[Tesis doctoral en ciencias con mención en Geología]. Universidad de Chile, Santiago.*
61. Valdivia, J., Torres, A. y Montoya, C. (1995). “Aspectos Estratigráficos y Tectono-Estructurales en la Localización de Mineralización Metálica en el Sector Sur Occidental de los Andes Peruanos”. *Sociedad Geológica del Perú (SGP), pp. 337-349. Lima, Perú.*
62. Valdivia, V., Toro, J., Mamani, M. y Terán, J. (2014). “Chipispaya: Un Pórfido Cu-Au del Mioceno Inferior en el Sur del Perú”. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú (SGP), vol. 109, pp. 061-066. Lima, Perú.*
63. Valdivia, V., Mamani, M., Toro, J. y Terán, J. (2015). “Aplicación de la Geocronología y Litogeoquímica a la Exploración de Pórfidos en el Paleoceno”. *Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (7). ProExplo 2015. Lima, Perú.*
64. Vargas, Jim J. (2019). “Pruebas metalúrgicas integral para el tratamiento de un pórfido de Cu-Mo en la unidad de Porvenir – Compañía Minera Milpo – 2019”. *[Tesis de grado para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Arequipa, Perú.*
65. Vargas, L. (1970). “Geología del Cuadrángulo de Arequipa 33-s [Boletín A24]”. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, N°24, 79p. Lima, Perú.*

66. Wilson, J. Y Garcia, W. (1962). “Geología de los Cuadrángulos de Pachia y Palca (Hojas 36-v y 36-x)”. *Comisión Carta Nacional, vol. 2, N°4. Lima, Perú.*
67. Winter, J. (2001). “An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology”. *Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 699 p.*

ANEXOS

Anexo N°1: Datos Tomados de Campo Para Sulfuros Primarios y Sulfuros Secundarios de Cobre

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	LITOLOGÍA
SP-1	99304.00	34500.00	3081.35	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-2	99049.99	34849.98	2957.55	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-3	97399.76	35849.93	2882.67	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-4	97689.07	36100.00	3145.25	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-5	97699.86	36149.91	2882.47	Potásica del tipo Biotítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-6	99000.75	35401.00	3075.46	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-7	98794.98	35599.95	3040.44	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-8	96904.10	36002.85	3240.71	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-9	97599.16	36001.30	3032.80	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-10	97300.50	36198.18	3191.90	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-11	98898.43	35102.31	3077.44	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-12	98999.66	35100.93	3060.76	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-13	99200.00	35149.88	2959.12	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Diorita
SP-14	99304.40	35203.75	3034.10	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Primarios	Diorita
SP-15	99200.59	34951.14	2964.48	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-16	98952.00	35151.00	2867.68	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-17	98549.98	35203.04	3088.92	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-18	97950.30	35549.17	3108.60	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-19	98955.00	35200.00	2868.09	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-20	97099.80	35850.00	2912.87	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-21	97981.60	35929.91	2795.00	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-22	97599.98	35900.00	2747.99	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-23	97249.84	35999.95	2868.16	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-24	97649.99	36300.14	3002.80	Potásica del tipo Feldespato Potásico	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-25	99099.75	34600.87	3077.53	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-26	99199.83	34700.03	2988.53	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-27	99095.94	35200.83	3052.57	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-28	98620.10	35500.00	3066.96	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-29	97400.00	35749.98	2883.04	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-30	96949.69	35900.16	2928.03	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-31	98235.97	35949.89	3052.50	Argílico Intermedio	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-32	98777.52	35176.00	3106.79	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-33	98800.01	35150.01	2747.55	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-34	98950.03	35250.01	2974.98	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-35	97800.10	35849.77	2867.65	Potásica Parcial	Sulfuros Primarios	Macropórfido Dacítico
SP-36	99299.87	34800.93	3059.47	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-37	99099.84	35099.52	3018.34	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-38	99248.92	35099.59	2958.06	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-39	98650.03	35599.98	3048.83	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Granodiorita
SP-40	97549.90	35699.92	3002.71	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SP-41	96921.06	35881.20	3228.39	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P2
SP-42	97004.59	36046.79	3013.04	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-43	96950.70	36097.00	3214.80	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P1
SP-44	97399.50	35800.40	3077.57	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Primarios	Pórfido Monzonita P3
SS-1	99251.01	34400.00	3077.53	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-2	99200.02	35334.99	3060.46	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-3	98959.02	35549.91	3039.44	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-4	98242.21	35750.10	3082.99	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-5	98305.51	35950.02	3053.97	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-6	96850.00	35401.00	3068.65	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-7	99079.96	35399.99	3020.21	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P2
SS-8	97999.98	35549.92	3047.96	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-9	98599.99	35549.98	3055.36	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-10	96950.11	35600.00	2972.42	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-11	98049.90	35597.90	3106.45	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-12	98199.69	35599.97	3106.56	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-13	98249.63	35598.69	3096.70	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-14	98092.90	35657.86	3101.72	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-15	98097.94	35651.07	3091.97	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-16	98300.63	35701.66	3070.77	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-17	96950.01	35800.00	2903.17	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P2
SS-18	97982.23	35909.96	2797.85	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-19	96549.98	35950.00	3093.46	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-20	98235.97	35949.89	3052.50	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-21	97097.38	36000.26	3228.70	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-22	96940.07	36201.20	3186.44	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P1
SS-23	96909.78	36244.16	3186.56	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-24	97034.94	36299.99	2944.24	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-25	98182.45	35312.63	3084.63	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Granodiorita
SS-26	99299.98	35301.03	3062.45	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-27	99399.98	35246.43	3047.80	Argílico Intermedio	Sulfuros Secundarios	Diorita
SS-28	99399.77	34901.00	3071.59	Fílica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Secundarios	Pórfido Monzonita P2

Anexo N°2: Datos Tomados de Campo Para Óxidos de Cobre y Sulfuros Transicionales

MUESTRA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	LITOLOGÍA
OX-1	102214.39	33699.78	3103.22	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-2	101991.62	33900.50	3128.90	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-3	102042.63	34302.69	3100.75	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-4	101853.10	34300.82	3155.58	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-5	102147.40	33842.44	3127.92	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-6	97900.11	36100.06	3033.25	Argílica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-7	102124.49	34304.73	3248.59	Argílica	Óxidos	Brecha freática con matriz de turmalina
OX-8	102347.57	33392.67	3200.35	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-9	101978.10	33925.27	3193.51	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-10	102048.23	34153.25	2971.51	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-11	102090.64	34568.63	3125.95	Argílica	Óxidos	Dacita Porfírita
OX-12	102086.70	34102.39	3189.14	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-13	102044.99	34225.02	2978.39	Argílica	Óxidos	Granodiorita
OX-14	97696.10	36306.90	3035.44	Argílica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-15	102549.04	33458.26	3047.35	Argílica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-16	97597.75	36097.93	3064.62	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-17	97749.65	35899.87	3053.51	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-18	97698.75	35800.18	3029.90	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-19	97549.73	35850.43	3014.76	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P3
OX-20	97542.00	36106.00	3095.73	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-21	100100.00	34749.99	3112.39	Argílica - Filica	Óxidos	Granodiorita
OX-22	98163.02	35908.78	3016.78	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P1
OX-23	97450.15	36050.12	3094.98	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P3
OX-24	97500.37	36098.43	3110.46	Argílica - Filica	Óxidos	Pórfido Monzonita P3
ST-1	98079.43	35749.95	3026.25	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Macropórfido Dacítico
ST-2	99510.04	34547.00	3064.53	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-3	99212.45	35202.52	3046.45	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Diorita
ST-4	101973.65	34000.86	2964.17	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-5	102048.23	34153.25	2987.64	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-6	97496.00	36339.50	2977.35	Potásica del tipo Clorítico	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-7	96935.90	35750.00	2973.35	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-8	98689.73	35099.68	3104.38	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-9	98499.62	35002.22	3081.54	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-10	99299.47	35009.16	3019.16	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P2
ST-11	98299.75	35798.87	3069.16	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-12	99400.05	34799.50	2963.66	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-13	98901.46	35346.52	2961.86	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-14	102153.28	33950.26	2959.85	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-15	102123.05	33989.77	3028.98	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-16	102086.70	34102.39	3041.89	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-17	102086.70	34102.39	3026.31	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-18	97749.92	36095.56	3025.09	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-19	97201.52	35650.37	3047.73	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P2
ST-20	97750.02	35375.23	3107.84	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-21	97320.52	35801.48	3078.66	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-22	97200.64	35599.26	2912.72	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P2
ST-23	96615.00	35900.00	3078.66	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-24	97403.30	35692.18	3169.95	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-25	99200.23	35053.06	3017.28	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-26	98949.14	35102.45	3006.35	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-27	99350.00	35347.00	2995.71	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-28	101971.95	34173.80	3020.45	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Dacita Porfírita
ST-29	97850.66	35749.93	3020.37	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-30	97748.39	35800.81	3029.44	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-31	97175.35	35800.36	3048.78	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-32	97500.06	35849.29	2986.92	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P3
ST-33	97498.92	36203.31	3064.09	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Pórfido Monzonita P1
ST-34	99299.99	35427.00	3107.86	Argílico Intermedio	Sulfuros Transicional	Granodiorita
ST-35	98300.01	35299.94	3083.12	Filica (cuarzo - sericita)	Sulfuros Transicional	Granodiorita

Anexo N°3: Análisis Qemscan de Muestras de Campo Clasificados por Zonas de Mineralización

MUESTRA	MINERALIZACIÓN MACROSCÓPICA	ANÁLISIS SECUENCIAL DE COBRE							ORE TYPE	ANÁLISIS QEMSCAN							
		CuT	CuSAc	CuSCn	CuR	ISAC	ISCN	INSO		Cpy	Cc	Cv	Bn	Tetra	Enarg	Cu/Micas	Other(Cu)
SP-2	Sulfuros Primarios	0.41	0.01	0.01	0.39	2.53	2.29	95.18	Sulfuros Primarios	0.341	0.013	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.021
SP-9	Sulfuros Primarios	0.61	0.01	0.01	0.59	1.64	0.98	97.38	Sulfuros Primarios	0.531	0.047	-	-	-	0.047	-	-
SP-16	Sulfuros Primarios	1.16	0.02	0.06	1.08	1.80	5.47	92.73	Sulfuros Primarios	1.163	0.024	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.011
SP-27	Sulfuros Primarios	0.28	0.03	0.02	0.23	9.55	7.43	83.02	Sulfuros Primarios	0.270	0.014	0.001	0.001	0.000	0.005	0.001	0.006
SP-43	Sulfuros Primarios	0.30	0.01	0.02	0.27	3.48	7.15	89.38	Sulfuros Primarios	0.307	0.006	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.004
SS-6	Sulfuros Secundarios	0.56	0.08	0.44	0.04	13.97	78.36	7.67	Sulfuros Secundarios	0.059	0.537	0.098	0.011	0.000	0.018	0.007	0.032
SS-7	Sulfuros Secundarios	0.73	0.08	0.57	0.09	11.30	76.93	11.76	Sulfuros Secundarios	0.078	0.516	0.050	0.021	0.000	0.016	0.008	0.016
SS-13	Sulfuros Secundarios	0.38	0.06	0.31	0.02	14.80	80.68	4.53	Sulfuros Secundarios	0.050	0.272	0.049	0.008	0.000	0.001	0.002	0.006
SS-19	Sulfuros Secundarios	0.79	0.14	0.58	0.07	17.90	73.37	8.74	Sulfuros Secundarios	0.029	0.570	0.008	0.025	0.000	0.001	0.006	0.129
SS-22	Sulfuros Secundarios	0.37	0.05	0.31	0.02	12.33	82.25	5.42	Sulfuros Secundarios	0.091	0.263	0.005	0.020	0.000	0.001	0.003	0.008
ST-3	Sulfuros Transicional	0.39	0.05	0.12	0.23	11.86	30.10	58.04	Sulfuros Transicional	0.155	0.155	0.014	0.031	-	-	-	-
ST-8	Sulfuros Transicional	0.40	0.04	0.12	0.24	9.80	31.16	59.05	Sulfuros Transicional	0.207	0.143	0.023	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
ST-10	Sulfuros Transicional	0.62	0.06	0.30	0.26	9.11	49.03	41.85	Sulfuros Transicional	0.201	0.370	0.069	0.024	-	-	-	-
ST-19	Sulfuros Transicional	0.64	0.02	0.22	0.39	3.85	34.28	61.87	Sulfuros Transicional	0.400	0.208	0.046	0.011	0.000	0.005	0.001	0.002
ST-34	Sulfuros Transicional	0.69	0.11	0.49	0.10	15.71	70.61	13.69	Sulfuros Transicional	0.120	0.490	0.026	0.050	0.000	0.000	0.004	0.004