UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE COBALTO EN RELAVES MINEROS-PROYECTO EL ROBLE

Daniel Ramírez Arias

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Antioquia, Colombia
2020

FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE COBALTO EN RELAVES MINEROS-PROYECTO EL ROBLE

Daniel Ramírez Arias

Trabajo final o tesis de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería: Recursos Minerales

Director:

M.Sc. Ph.D. Nestor Ricardo Rojas Reyes

Línea de Investigación:

Geología Económica-Metalurgia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Antioquia, Colombia

2020

Dedicatoria

A mi familia

“La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones".

Albert Einstein

Agradecimientos

Para el profesor Nestor Ricardo Rojas de la Universidad Nacional quien con su guía desde el inicio ha transmitido excelentemente sus enseñanzas tanto en el ámbito académico como laboral.

A Jaime Rosero especialmente y el grupo experimental del laboratorio CIMEX de la Universidad Nacional quienes aportaron de manera significativa con las pruebas metalúrgicas y parte de la caracterización química de este trabajo.

Para la compañía minera Atico Mining Corporation en la cual he podido formarme profesionalmente, además de brindarme las herramientas necesarias para desarrollar este documento.

Para el equipo de geología mina y exploraciones de Atico Mining Corporation especialmente Diego Armando Henao y Sebastián Echeverry quienes contribuyeron de manera imperativa en la ejecución de este trabajo de tesis con sus conocimientos en Sistemas de Información Geográfica, estimación de recursos y modelamiento geológico.

Factibilidad de extracción de cobalto en relaves mineros-Proyecto El Roble

Resumen

El proyecto minero El Roble clasificado como un yacimiento tipo VMS es reconocido a la fecha por ser la principal fuente de cobre en Colombia. El presente trabajo describe el análisis técnico para considerar o no el residuo del proceso y/o el material explotado como mena de cobalto de baja ley. Dichos estudios comprenden una estimación de recursos de cobalto realizada mediante técnicas estadísticas como Kriging ordinario en los principales cuerpos de sulfuro del depósito que arrojó valores promedio entre 450 a 480 ppm lo que se contempla en los estándares del servicio geológico estadounidense y británico para otros depósitos de este tipo en diferentes partes del mundo. Una vez cuantificado el material y realizado unas caracterizaciones preliminares con FRX, se interpreta que la asociación mineralógica de cobalto comprende principalmente minerales de hierro de alta temperatura de formación como pirrotina, magnetita y “pirita de alta temperatura” según la génesis del depósito VMS de El Roble y tomando como referencia la paragénesis de yacimientos Cu-Au-Co con similares características como Windy Craggy en Canadá.

Luego de lo anterior, se realizó nuevamente una caracterización química por FRX y por ICP-MS tanto en muestras compósito de concentrado como de relave, lo que evidenció que el cobalto no sufre variaciones significativas de concentración según su cantidad in situ si se compara con lo arrojado en el actual proceso de beneficio, por tanto, se llevaron a cabo diferentes tipos de pruebas metalúrgicas a escala laboratorio resaltando las de beneficio por flotación que mostraron mayor eficiencia la cual puede ser optimizada en el mediano plazo. Bajo ese escenario, respecto a la factibilidad de extracción y comercialización de cobalto se considera más rentable incluirlo como un *commodity* secundario dentro del concentrado principal de cobre a exportar siendo refinado de manera independiente como subproducto.

Palabras clave: Proyecto El Roble, cobalto, geometalurgia, factibilidad de extracción

Cobalt extraction feasibility from mining tailings-El Roble project

Abstract

El Roble project has been currently classified as a VMS deposit as well as the main copper source of Colombia. This work also describes some evidences of its potential as cobalt ore. Those evidences are based on a estimation of cobalt resources made in the main El Roble ore bodies which showed average values from 450 to 480 ppm which according to the United States and british geological surveys standards for this sort of deposit would be classified within a low value cobalt ore. Once the material was quantified taking into consideration preliminary FRX assays, the mineral association of cobalt had to be interpreted. Hence, it is presumed that minerals such as “high temperature pyrite”, phyrrotite and magnetite formed under high temperature conditions according to the VMS deposit genesis would be associated with cobalt also considering as reference other Cu-Au-Co deposits with the same characteristics, for instance, Windy Craggy in Canada.

Based on this, chemical characterization was made by using FRX and ICP-MS analysis respectively for composite samples of concentrates as well as mining tailings which showed that the cobalt concentration is unaffected by the current flotation plant process. Therefore, a different set of lab scale metallurgical tests were made. Froth flotation tests showed good efficiency in order to find how to optimize cobalt concentration in the medium term. In regards to cobalt extraction and trading feasibility at the moment it is considered more profitable to include it as a secondary commodity within the main copper concentrate negotiation rather than recovering it from the mining tailings directly.

Keywords: El Roble project, cobalt, geometallurgy, extraction feasibility

Contenido

Pág.

Resumen ..... **V**

Lista de figuras ..... **IX**

Lista de tablas ..... **XI**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XII**

Introducción **1**

Objetivos **4**

1. Marco teórico **5**

2. Mina El Roble **9**

3. Evaluación mineralógica-multielemento **12**
3.1 Determinación de valores de cobalto en el depósito 12
3.2 Cuerpo de mineral Zeus 16
3.2.1 Asociación mineralógica 17
3.2.2 Etapa de muestreo en presa de relaves 25
3.3 Cuerpos de mineral Maximus y Goliat 27

4. Modelo de concentración metalurgico **30**
4.1 Separación magnética 30
4.2 Tostación 32
4.3 Flotación 34
4.4 Resultados a partir de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) 37

5. Análisis económico de factibilidad **41**
5.1 Oferta y demanda de cobalto en el mundo 41
5.1.1 Demanda 41
5.1.2 Oferta 43
5.1.3 Precio en el mercado 44
5.2 Evaluación económica 46
5.2.1 Indicadores económicos (VAN, TIR, análisis de sensibilidad) 49

6. Conclusiones y recomendaciones 52
6.1 Conclusiones 52
6.2 Recomendaciones 53

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Logueo gráfico del pozo 88-44 el cual evidencia las asociaciones mineralógicas-multielemento dominantes en la secuencia del depósito Windy Craggy en Canadá. 6
Figura 2-1: Ubicación geográfica-proyecto minero El Roble. 9
Figura 2-2: Identificación y acceso a los cuerpos de mineral-proyecto El Roble. 10
Figura 2-3: Procesos en planta de beneficio simplificado de la operación minera El Roble. 11
Figura 3-1: Valores de cobalto (en sondajes) históricamente, proyecto minero El Roble.. 12
Figura 3-2: Histograma donde se comparan índices de frecuencia en función de los valores de cobalto (ppm) y litología principal (tipo de roca) del depósito El Roble. 14
Figura 3-3: Curva de distribución gaussiana general de los valores de cobalto en sondajes diamantinos. 14
Figura 3-4: Sólidos modelados en 3D de los cuerpos mineralizados Zeus, Maximus y Goliat. 15
Figura 3-5: Modelo de bloques de los cuerpos mineralizados Zeus, Maximus y Goliat construido a partir de valores de cobalto usando Kriging ordinario 15
Figura 3-6: Información del Voxel del cuerpo Zeus a partir de los parámetros usados para su construcción. 16
Figura 3-7: Vista en planta del cuerpo Zeus modelado con valores de cobalto v.s cartografía geológica escala 1:250, nivel 1837.. 18
Figura 3-8: Vista en planta del cuerpo Zeus modelado con valores de cobalto v.s cartografía geológica escala 1:250, nivel 1797... 19
Figura 3-9: Vista en planta del cuerpo Zeus modelado con valores de cobalto v.s cartografía geológica escala 1:250, nivel 1757. 20
Figura 3-10: Vista en planta del cuerpo Zeus modelado con valores de cobalto v.s cartografía geológica escala 1:250, nivel 1722. 21
Figura 3-11: Lentes de sulfuro masivo idealizados ilustrando zonaciones características para minerales hipógenos. 22
Figura 3-12: Correlación lineal entre valores de cobalto y hierro tomados de los sondajes diamantinos. 23
Figura 3-13: Correlación lineal entre valores de cobalto y cobre tomados de los sondajes diamantinos. 23

Figura 3-14: Correlación lineal entre valores de cobalto y oro tomados de los sondajes diamantinos. 24
Figura 3-15: Puntos de muestreo sobre presa de relaves y usando barreno tipo hand auger. 25
Figura 3-16: Equipo Epsilon 1 usado para análisis de fluorescencia de rayos X 26
Figura 3-17: Modelo de bloques de los cuerpos Maximus y Goliat teniendo en cuenta valores de cobalto en ppm. 28
Figura 3-18: Información del *Voxel* de los cuerpos Maximus y Goliat a partir de los parámetros usados para su construcción. 28
Figura 4-1: Separador magnético usado para pruebas de separación, laboratorio CIMEX. 32
Figura 4-2: Diagrama de Ellingham de varios metales que producen la energía libre para formación de óxidos y la correspondiente presión parcial de oxígeno en el equilibrio. 33
Figura 4-3: Máquina de flotación tipo Denver utilizada para las pruebas, laboratorio CIMEX. 37
Figura 5-1: Evolución del mercado del cobalto en los últimos años. 41
Figura 5-2: Proyección de la demanda de cobalto al año 2035 42
Figura 5-3: Producción global de cobalto por tipo de mineral en 2017.. 43
Figura 5-4: Proyección de la oferta de cobalto al año 2035. 44
Figura 5-5: Fluctuación en el precio del cobalto a partir de los últimos 5 años desde enero de 2015 a abril de 2020. 45
Figura 5-6: Proyección del precio de cobalto entre 2020 a 2035. 45

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Rangos numéricos entre 0 a 1 indicando coeficiente de relación lineal para un conjunto de variables..... 24
Tabla 3-2: Valores multielemento preliminares obtenidos por FRX de las muestras tomadas en la presa de relaves..... 27
Tabla 4-1: Valores químicos preliminares del relave separado magnéticamente dados por fluorescencia de rayos X. 31
Tabla 4-2: Resumen de las variables utilizadas en los ensayos de flotación..... 35
Tabla 4-3: Muestras escogidas para análisis de ICP-MS a partir de pruebas metalúrgicas. 38
Tabla 4-4: Resultados geoquímicos obtenidos mediante análisis por ICP-MS a partir de pruebas metalúrgicas. 38
Tabla 5-1: Valores económicos idealizados para el desarrollo del proceso alterno de beneficio..... 47
Tabla 5-2: Parámetros usados para cálculo de flujos de caja (FC) y valor actual neto (VAN) en un período de 5 años..... 49
Tabla 5-3: Evaluación de la tasa interna de retorno (TIR) en función del valor anual neto (VAN). 50
Tabla 5-4: Análisis de sensibilidad VAN acumulado en función del precio y costos tanto de cobre como cobalto. 51

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
λ_i	Ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i	1	Ecuación 2.1

Superíndices y Subíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia
$Z(S_i)$	Valor medido en la ubicación i
S_0	Ubicación de la predicción
N	Cantidad de valores medidos
R	Coeficiente correlación lineal de Pearson
I	Inversión inicial

Abreviaturas

Abreviatura	Término
VMS	Sulfuro Masivo Volcanogénico
FRX	Fluorescencia de rayos X
DRX	Difracción de rayos X
ppm	Partes por millón
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente

Introducción

Miner S.A (minera El Roble) es una empresa del grupo peruano-canadiense Atico Mining Corporation, con un complejo minero-industrial que explota y comercializa mineral cuprífero, a partir de un proceso metalúrgico, para producir un concentrado rico en cobre. La infraestructura está ubicada en el departamento de Chocó y su operación a mediana-pequeña escala, con alrededor de 8 años de desarrollo, tiene influencia directa en la subregión de la vereda El Roble, dentro del municipio del Carmen de Atrato.

A lo largo de las últimas décadas el yacimiento del proyecto minero El Roble se ha caracterizado como la principal mena de cobre de Colombia, teniendo como subproducto principal oro sin embargo, análisis más recientes han evidenciado valores interesantes de cobalto asociados al cuerpo de sulfuros denominado Zeus el cual constituye cerca del 95% de la producción a corto y largo plazo; es por esto que se considera importante la realización de una evaluación geometalúrgica y económica tomando como base los últimos valores de cobalto en el concentrado polimétalico (producto final) que se comercializa a nivel internacional y la posible aparición del mismo en los relaves del proyecto.

En la mina El Roble existe un circuito de beneficio mediante el cual procesos como la flotación se centran principalmente en la concentración de cobre por encima del 90% con una calidad de concentrado o ley aceptable para su comercialización. Sin embargo, es hasta el año 2018 cuando se detecta que dentro del cuerpo de sulfuros principal podría existir otro tipo de metal con interés económico (cobalto en este caso) el cual hasta el momento es desconocida su asociación mineralógica y elemental.

El yacimiento explotado por la multinacional canadiense Atico Mining posee a su vez valores importantes de oro contenido en pirita y calcopirita cuya recuperación en planta no ha sido optimizada hasta el momento por lo cual gran parte del subproducto (que incluye oro y otros metales) termina en el relave permitiendo proponer una variante en el diseño de una concentración metalúrgica allí. Así mismo, durante la operación diaria, se alimenta un material que no está claramente caracterizado por sus propiedades geometalurgicas, es decir, se mezclan todos los tipos de mineral sin tener en cuenta su asociación; lo cual

plantea un problema o reto ya que no se puede predecir plenamente el comportamiento del nuevo metal dentro del circuito sin lograr optimizar su recuperación.

En vista de que las colas (o relaves mineros) contienen cantidades mezcladas inciertas de los cuerpos Zeus, Maximus y Goliat a la vez, y que no es posible separarlas dentro de la presa, en este trabajo se asume que la concentración de cobalto y otros elementos obtenida a partir de calcular un promedio de las muestras de los análisis químicos (ICP-MS y FRX) en los relaves es la misma para todo el material, en el caso del cobalto oscilando entre 450 a 480 ppm; cabe resaltar que en el mediano plazo esto requerirá una mayor dispersión de datos o muestras debido al volumen del material en la presa.

Otro aspecto para tener en consideración es la exactitud del método usado en este trabajo para la detección del cobalto como tal, por ejemplo, la espectroscopia de fluorescencia de rayos x (FRX) que es un método semicuantitativo, en ocasiones presenta limitada sensibilidad para la lectura de elementos con mínima presencia, a diferencia de lo que si puede llegar a hacer de manera más precisa la espectrometría de masas-plasma (ICP-MS) con la capacidad de cuantificar las concentraciones de un rango mínimo de 5 órdenes de magnitud.

Debido a que en la actualidad no se ha evaluado la relación de valores anómalos de cobalto en función de otros metales en El Roble, este trabajo busca identificar no solo su existencia sino su asociación mineralógica dentro de las colas o relaves que contienen cantidades interesantes de este metal permitiendo así plantear un posible método para su concentración. Posteriormente, llevar a cabo una evaluación económica que permita brindar herramientas para la toma de decisiones respecto a la factibilidad de concentrar cobalto ya sea desde el relave producido por el proyecto o desde el mismo momento de la extracción minera. Además de lo anterior, actualmente no existen trabajos que documenten yacimientos de cobalto explotables en depósitos tipo sulfuro masivo volcanogénico (VMS) en Colombia, por lo cual se buscaría hacer una recopilación de información bibliográfica y pruebas de laboratorio en aras de abrir un capítulo inexplorado para futuras investigaciones técnicas respecto a este tema.

El resultado y ejecución de esta propuesta (en caso de arrojar valores positivos) se espera, pueda verse reflejado como un “plus” en los dividendos sobre el ingreso total del proyecto minero El Roble, lo cual sería cuantificable a través del balance de utilidades que presenta periódicamente el área de costos y productividad o en su defecto, como parte del plan de cierre de mina teniendo en cuenta su estudio de vida útil, así, esta propuesta también puede contemplarse como una alternativa respecto al aprovechamiento de residuos. En

caso de que el estudio de factibilidad (VAN, TIR, análisis de sensibilidad) entregue valores negativos, esta información servirá como base para replantear la ejecución de dicho proceso una vez el precio del metal aumente.

Si bien algunos de los valores determinados para la ejecución del estudio son reales, estos no son publicados en su totalidad o son parcialmente cambiados cumpliendo con las cláusulas de confidencialidad que estipula la empresa Atico Mining dueña del proyecto. Es de resaltar por otro lado, que para la realización de pruebas metalúrgicas a escala laboratorio se involucra el Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia logrando así una alianza “academia-industria” que promueve la investigación no solo en este proyecto sino en otras multinacionales mineras de estas características.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de factibilidad técnica con respecto a la concentración de cobalto a partir de los relaves mineros del proyecto El Roble.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la cantidad de cobalto económicamente concentrable (si existe) en los relaves del proyecto minero El Roble mediante una caracterización química.

- Realizar una estimación de recursos de cobalto en los cuerpos principales a lo largo de la historia reciente de El Roble teniendo en cuenta la información geoquímica contenida en los sondajes diamantinos.

- Realizar una caracterización mineralógica del cuerpo Zeus con el fin de identificar asociaciones de cobalto con otros elementos y/o minerales.

- Plantear un modelo de concentración metalúrgico de cobalto dependiendo su asociación mineralógica.

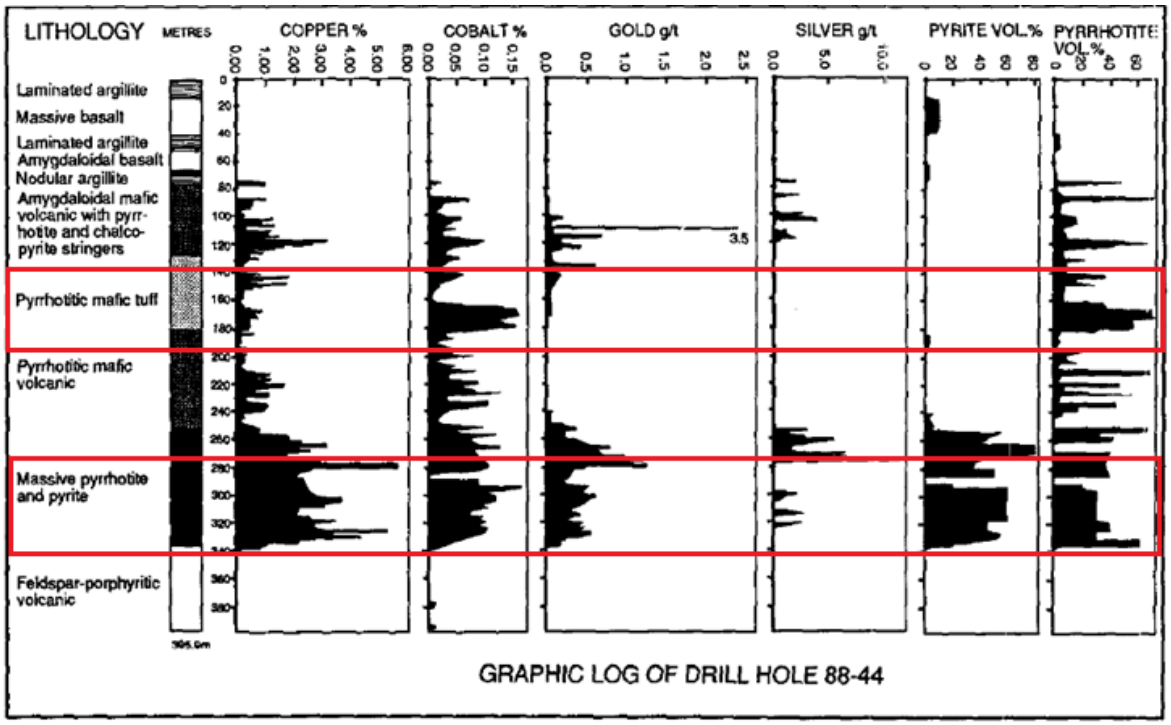
- Realizar un estudio económico que pueda justificar si es el caso la concentración de cobalto en los relaves mineros ubicados dentro de la infraestructura del proyecto.

1. Marco teórico

En general el concepto de geometalurgia para operaciones mineras a pequeña y mediana escala es muy restringido en vista del afán por obtener producción en el menor tiempo posible, principalmente en Colombia este es un campo en el cual poco se ha incursionado, por tanto, los antecedentes que rodean este tipo de estudios en el país son escasos. De acuerdo con Batterham y Grant (1992) el objetivo de la geometalurgia es mejorar el conocimiento de un mineral desarrollando métodos para medir parámetros importantes para su procesamiento. Esta información se utilizará para diseñar un proceso de aprovechamiento adecuado en un tipo de mineral dado, para gestionar y optimizar la producción de este. En este proyecto se asume como uno de los parámetros principales la asociación mineralógica entre cobalto con otros elementos y/o minerales.

De los más de 650 distritos de sulfuro masivo volcanogénico (VMS) existentes en el mundo a la fecha posiblemente el que guarda mayor relación con el depósito El Roble es *Windy Craggy* localizado en British Columbia (Canadá) puesto que contienen características geográficas, geológicas y mineralógicas muy similares. Se trata de un depósito con valores importantes de cobre y oro con la particularidad de tener a su vez una cantidad significativa de cobalto (600ppm) siendo este tomado como un *commodity* primario. La cobaltita (CoAsS) como se observa en la Figura 1-1 asociada a pirrotina masiva, magnetita y en menor proporción a calcopirita es la especie mineral de cobalto predominante en Windy Craggy (Peter, 1988). Texturas brechadas, stockwork y stringer evidencian actividad hidrotermal sobre una secuencia volcanosedimentaria infrayacida por flujos basálticos que al igual que en El Roble se encuentran intruídos por diques y *sills* de composición intermedia-básica. Además de lo anterior, tanto *Windy Craggy* como El Roble se ajustan claramente al modelo de clasificación genética para VMS de Franklin (Franklin et al., 2019) denominado "*Pelitic Mafic backarc type: sediment, mafic flow/sill dominated*" o depósito tipo trasarco pelítico-máfico dominado por sedimentos, flujos máficos y *sills*.

Figura 1-1: Logueo gráfico del pozo 88-44 el cual evidencia las asociaciones mineralógicas-multielemento dominantes en la secuencia del depósito Windy Craggy en Canadá (Peter, 1988).



Las concentraciones económicas de cobalto se pueden encontrar en cinco entornos geológicos diferentes (Hannis & Bide, 2009), en el caso de El Roble de acuerdo con su modelo genético se puede asociar a un “depósito alojado en sedimentos con influencia hidrotermal-volcanogénica”. El cobalto es casi siempre un subproducto de la minería de otros metales básicos, principalmente de níquel y cobre. Grandes cantidades de cobalto también se producen en el fondo marino, contenidas dentro de nódulos de manganeso y costras ricas en cobalto, aunque no son económicamente viables con la tecnología actual y las condiciones económicas (International Seabed Authority (ISA), 2008).

Debido a los avances tecnológicos y la creciente demanda de cobalto, un nuevo desarrollo para la extracción de éste es el re-tratamiento de los relaves en minas de cobre. Algunas minas de cobre históricas tienen grandes volúmenes de relaves con cantidades económicas de cobalto. Un ejemplo es el proyecto de relaves Kolwezi en la República Democrática del Congo, que comenzó su producción en 2010 convirtiéndose en uno de los proyectos productores de cobalto más grandes y de menor costo en el mundo (Adastra Minerals, 2004). El proceso de extracción planificado para este caso consiste en el

tratamiento de los relaves sólidos, que se crearon como un subproducto de la minería de cobre en la década de 1950, se rompen con pistolas de agua a alta presión y la suspensión resultante se bombea a una planta de procesamiento donde se extrae el cobalto, por métodos similares a los utilizados con minerales convencionales como lixiviación ácida, extracción por solventes y electro-obtención (Pryor & Lunt, 2003).

La concentración normalmente se lleva a cabo en o cerca del sitio de la mina e implica la trituración del mineral y la separación de minerales de ganga y cobalto, utilizando procesos físicos y químicos adecuados. En el caso de El Roble no es necesario llevar a cabo nuevamente un proceso de conminución puesto que el material particulado ya de por sí tiene un tamaño fino (pasante malla 200 o 75 µm).

Como ya se mencionó, el cobalto es casi siempre un subproducto de otros metales y cualquier proceso de beneficio dependerá de los requeridos para la extracción del metal primario. El procesamiento de cobalto generalmente comienza solo después de que el metal primario (generalmente cobre o níquel) se haya concentrado y extraído. El proceso suele ser exclusivo de la mineralogía del mineral explotado, en este caso cobre. Existen dos procesos básicos utilizados para la extracción de cobalto: hidrometalurgia (incluida la extracción con solventes, electrólisis y electrodeposición) y pirometalurgia (tostación de sulfuros y evaporación-condensación de metal de interés) (Hannis & Bide, 2009). De acuerdo con la posible paragénesis identificada en El Roble para el cobalto (asociado a pirita, magnetita, pirrotina o calcopirita) la pirometalúrgia podría jugar un papel importante en la extracción del elemento en cuestión.

Para citar un ejemplo, la mayor parte del cobalto obtenido del cinturón cuprífero de Zambia (principal fuente de cobalto en el mundo) se ha recuperado de los concentrados de flotación de cobre mediante un proceso llamado RLE que deriva de las palabras tostación, lixiviación y electro-obtención en inglés. Esto incluyó la tostación para los sulfuros, la lixiviación atmosférica con ácido sulfúrico y el cobre por electro-obtención directa; además de la eliminación de impurezas y la precipitación de hidróxido de cobalto, seguido a menudo de re-lixiviación y de cobalto electro-obtenido (Hannis & Bide, 2009).

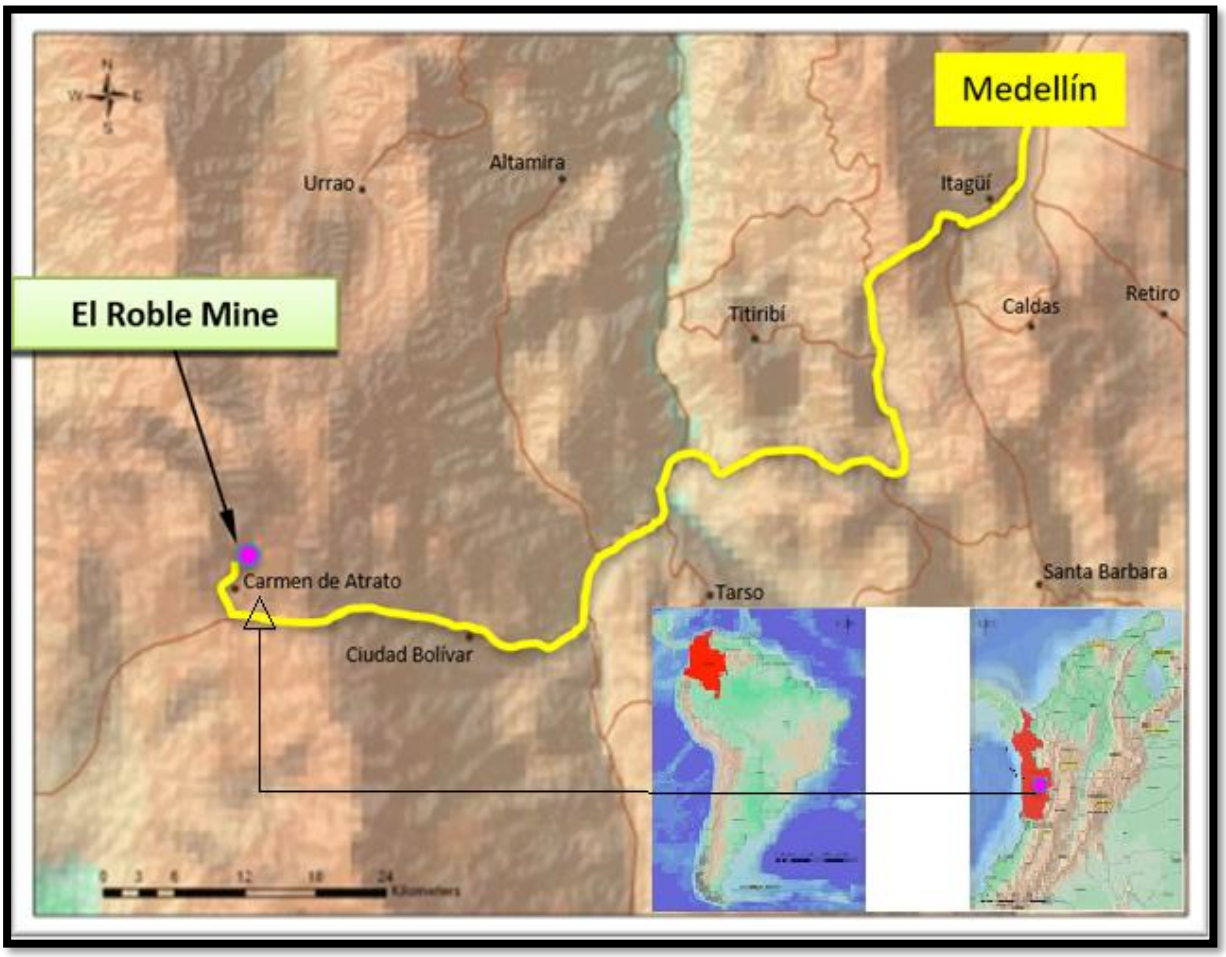
La etapa de flotación del cobre es generalmente ineficiente para el cobalto, con recuperaciones típicas de 40% para los óxidos y hasta 80% para los sulfuros, por lo que puede haber una cantidad sustancial de cobalto contenida en las represas de relaves que

podrían recuperarse, por ejemplo, como se mencionó anteriormente en el proyecto de relaves de Kolwezi en República del Congo propiedad de First Quantum en su momento. De manera similar, debido a que el cobalto sigue al hierro durante la fundición, algunas de las operaciones de la fundición de cobre han generado grandes vertederos de escoria con un alto contenido de cobalto, por ejemplo, Nkana en Zambia que contiene 0,65% de cobalto (Fisher, 2011).

2. Mina El Roble

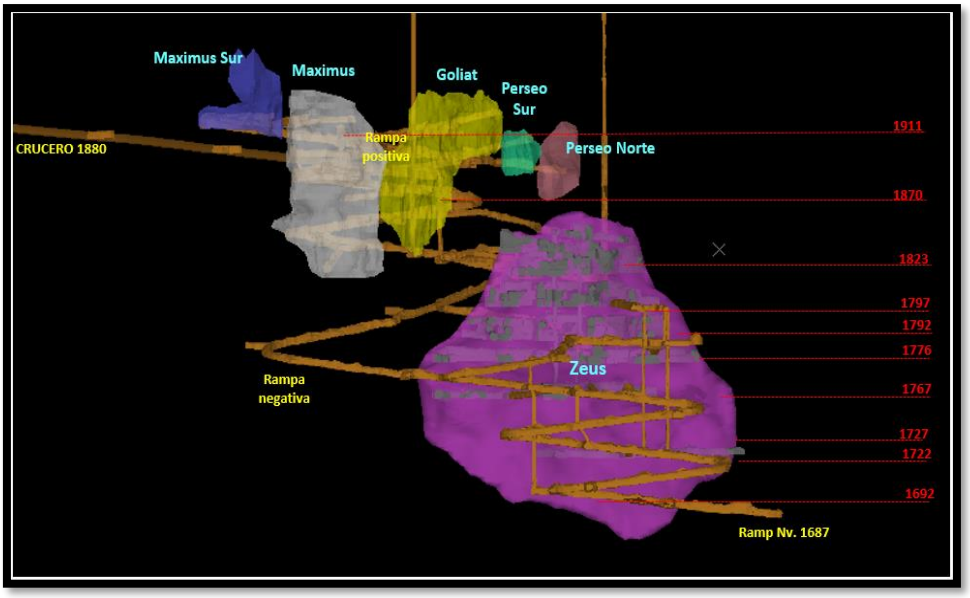
El proyecto minero El Roble se encuentra ubicado en la cordillera occidental de Colombia en el departamento del Chocó a 2 kilómetros en dirección NW del centro municipal del Carmen de Atrato (Figura 2-1). En la región el afluente principal es el río Atrato el cual fluye en sentido norte-sur; la geomorfología es abrupta con elevaciones desde 1600m a 2700m.

Figura 2-1: Ubicación geográfica-proyecto minero El Roble (Demetrius & Smith, 2012).



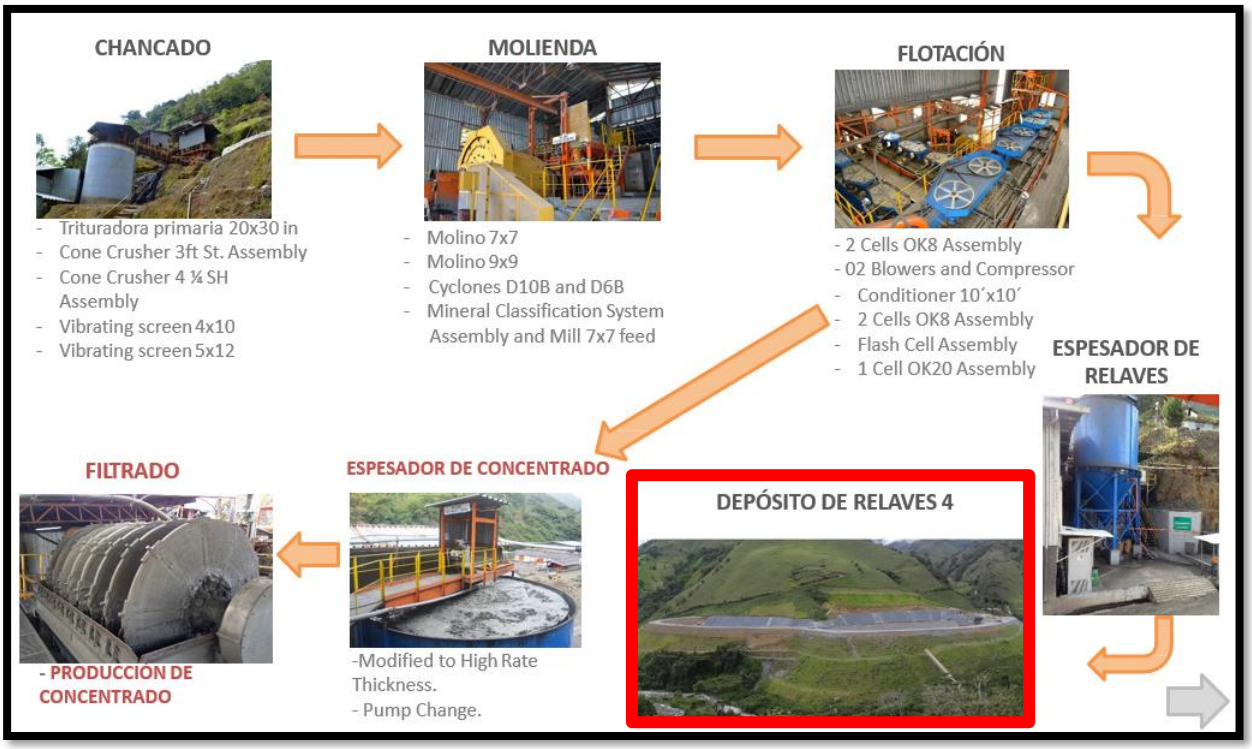
El Roble es propiedad de la compañía canadiense Atico Mining Corporation siendo reconocido como el único proyecto de explotación de cobre en Colombia, hasta el momento. Su producción de cobre es a pequeña escala con más de 9.355 toneladas cobre/año comparada con la producción de empresas como Codelco en Chile con más de 1,9 millones de ton/año y Freeport-McMoRan en Estados Unidos con más de 1,5 millones las cuales se posicionan como las mayores productoras (Agencia Nacional de Minería-Colombia, 2017). Sin embargo, dentro de Colombia El Roble enmarca un escenario de minería subterránea tecnificada que lo ubica entre los pioneros del país, así, según la UPME (2016) con más de 400 trabajadores, una producción de mineral alrededor de 900 toneladas/día, listando en la bolsa de valores de Toronto (TSX) y siendo el único depósito tipo sulfuro masivo volcanogénico explotado de manera importante, El Roble, proyecto de interés regional (PIRE) se comienza a posicionar como proyecto de interés nacional (PIN). Atico Mining Corporation ha desarrollado la operación minera desde el año 2012 en la "mina nueva" empezando por el acceso principal o crucero ubicado en la cota 1880 tal y como se observa en la Figura 2-2, posteriormente se lleva a cabo la explotación de los cuerpos Maximus, Goliat y Perseo (parcialmente) los cuales se encontraban a menor profundidad que el cuerpo denominado Zeus donde actualmente se realizan las actividades de extracción.

Figura 2-2: Identificación y acceso a los cuerpos de mineral-proyecto El Roble, modificado (Lechner & Earnest, 2016).



Dentro de la infraestructura de la compañía se cuenta además con un proceso de beneficio (Figura 2-3) donde es tratado el mineral extraído de la mina, este proceso que posee varias etapas comienza con la conminución de la partícula a un punto donde sea más eficiente su flotación y concentración para posteriormente ser llevado ya sea a un concentrado polimetálico (producto final) o a un depósito de relaves, que es donde se enfoca la ejecución de este trabajo.

Figura 2-3: Procesos en planta de beneficio simplificado de la operación minera El Roble, modificado (Demetrius & Smith, 2012).

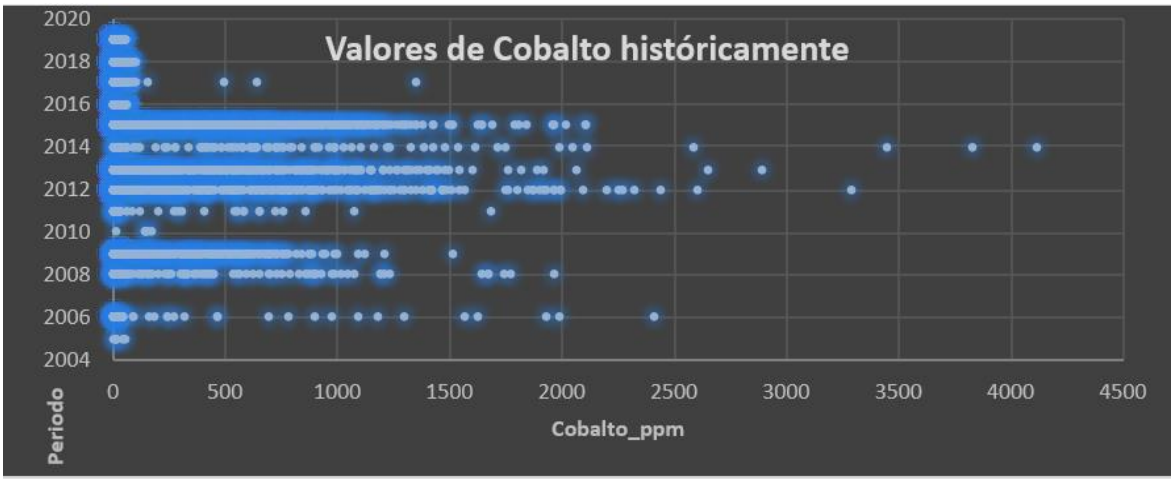


3. Evaluación mineralógica-multielemento

3.1 Determinación de valores de cobalto en el depósito

La primera fase de caracterización del depósito con base en los valores de cobalto se lleva a cabo evaluando 10.184 resultados geoquímicos obtenidos mediante ensayos por absorción atómica sobre este metal, dichos datos pertenecen a campañas de perforación hechas por la compañía a lo largo de 15 años evidenciando rangos de valores entre 0,2 a 4210 ppm como se observa en la Figura 3-1 con una media de 108 ppm contemplando tanto material mena como estéril. Entre el periodo 2012 al 2015 hay una mayor dispersión de muestras debido a que la perforación se encontraba en su apogeo, así mismo, es evidente que un amplio conjunto de datos supera los 400 ppm de cobalto, esto es relevante ya que según trabajos recopilatorios del servicio geológico británico y estadounidense (Hannis & Bide, 2009; Hitzman et al., 2017) dicha cantidad podría considerarse significativa como punto de partida para investigar la existencia de este metal como mena en un yacimiento tipo estratiforme como El Roble.

Figura 3-1: Valores de cobalto (en sondajes) históricamente, proyecto minero El Roble. Fuente: El autor.



Una vez reconocido el potencial del depósito respecto a valores de cobalto, se plantea el interrogante de si este material está siendo concentrado o no en el producto final durante su paso por el circuito de beneficio. Por tal razón se lleva a cabo en primera instancia una estimación de los valores de cobalto in situ en los cuerpos Zeus, Maximus y Goliat usando los resultados geoquímicos mencionados anteriormente.

Mediante el software MapInfo professional junto con su extensión Datamine Discover versión 2017 se realiza una estimación de recursos tomando como base los datos de cobalto en ppm solo dentro de los cuerpos mineralizados, es decir, a través de un método geoestadístico conocido como Kriging ordinario (Oliver & Webster, 1990) se construye un modelo de bloques conformado de celdas de 5 m alto x 5 m ancho x 5 m largo con un "radio de cobertura" de 50 m en vista del gran espaciamiento que existe entre algunos de los sondajes. Es importante resaltar que se realiza un tratamiento estadístico básico de los datos con el fin de llevar a cabo la estimación del *capping* o *top cut* en aras de no afectar la distribución de la variable principal, en este caso, el contenido de cobalto, tratando de controlar el llamado "efecto pepita" (Lane, 1988). Así, los valores estimados para tener en cuenta en la realización del método de interpolación fueron 0,1ppm como valor mínimo y 1650ppm como valor máximo (Figuras 3-2 y 3-3).

La siguiente ecuación (2.1) corresponde al principio básico de estimación por Kriging ordinario siendo $\boldsymbol{Z(S_i)}$ = el valor medido en la ubicación i, $\boldsymbol{\lambda_i}$ = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i, $\boldsymbol{S_0}$ = la ubicación de la predicción y $\boldsymbol{N}$ **=** la cantidad de valores medidos (Oliver & Webster, 1990).

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(s_i) \tag{2.1}$$

Inicialmente se modela en 3 dimensiones el sólido analizado (Figura 3-4) y luego las variables se interpolan asignándose una escala de colores por rangos realizando un *merge* o unión entre el sólido de los cuerpos de mineral modelados antiguamente con el nuevo modelo de bloques construido a partir de los valores de cobalto estimados como se observa en la Figura 3-5.

Figura 3-2: Histograma donde se comparan índices de frecuencia en función de los valores de cobalto (ppm) y litología principal (tipo de roca) del depósito El Roble donde: Kbc: chert negro, Kgc: chert gris, Kss: sedimentos detríticos, Kv: basalto, MS: sulfuro masivo, SMS: sulfuro semimasivo y Td: diques. Fuente: El autor.

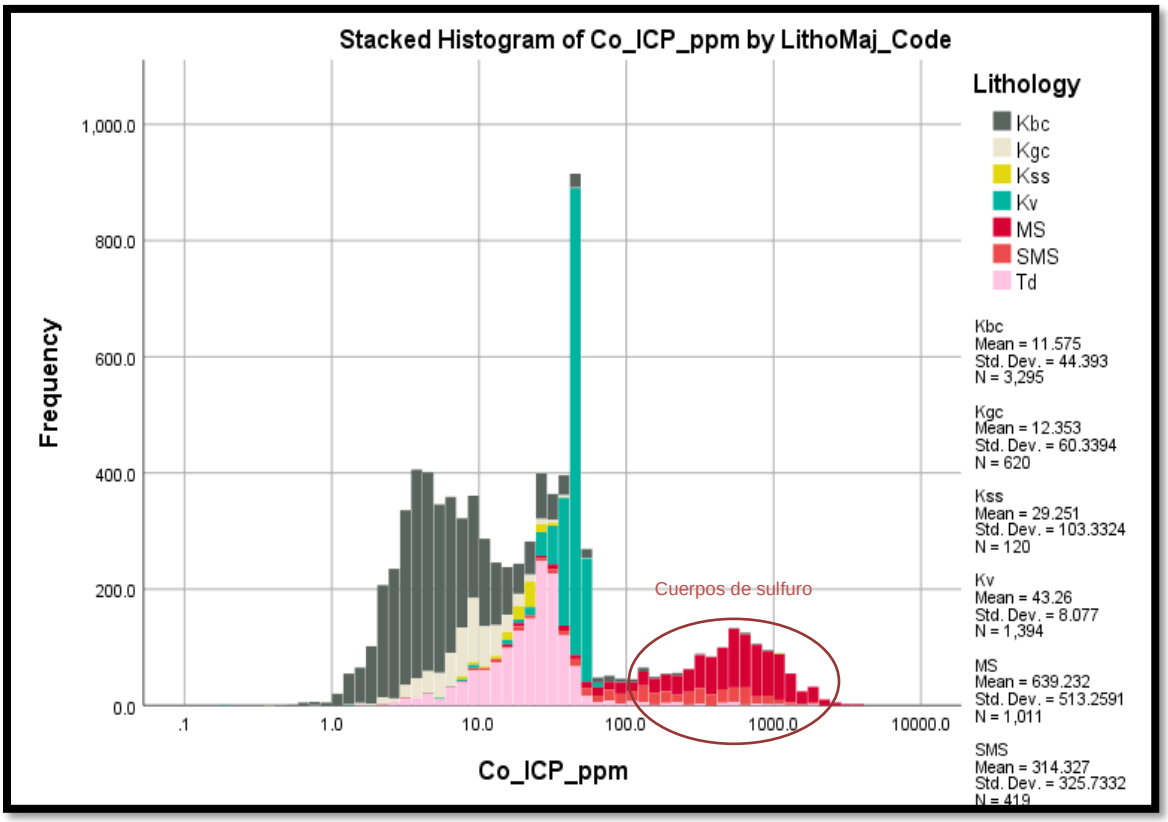


Figura 3-3: Curva de distribución gaussiana general de los valores de cobalto en sondajes diamantinos. Fuente: El autor.

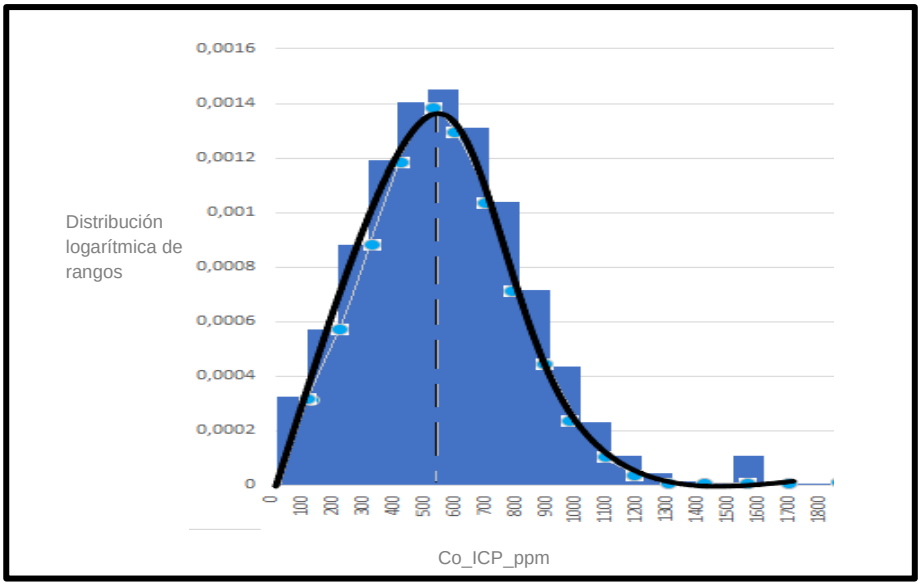


Figura 3-4: Sólidos modelados en 3D de los cuerpos mineralizados Zeus, Maximus y Goliat, vista en dirección SW-NE. Fuente: El autor.

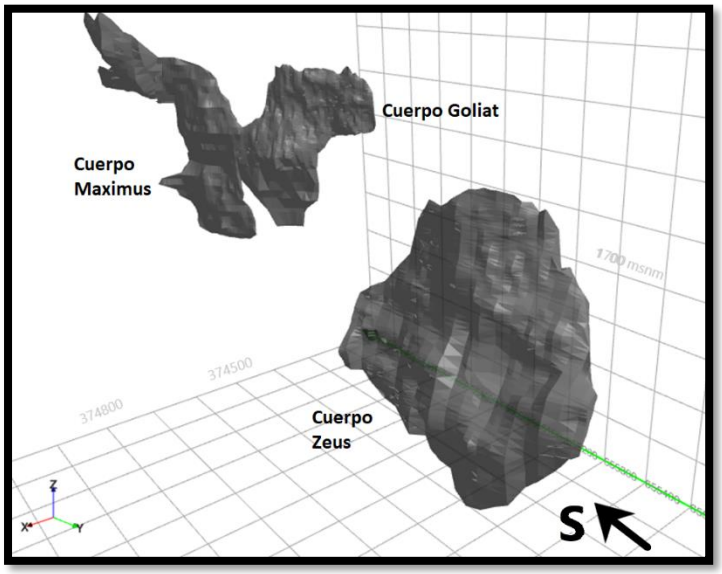
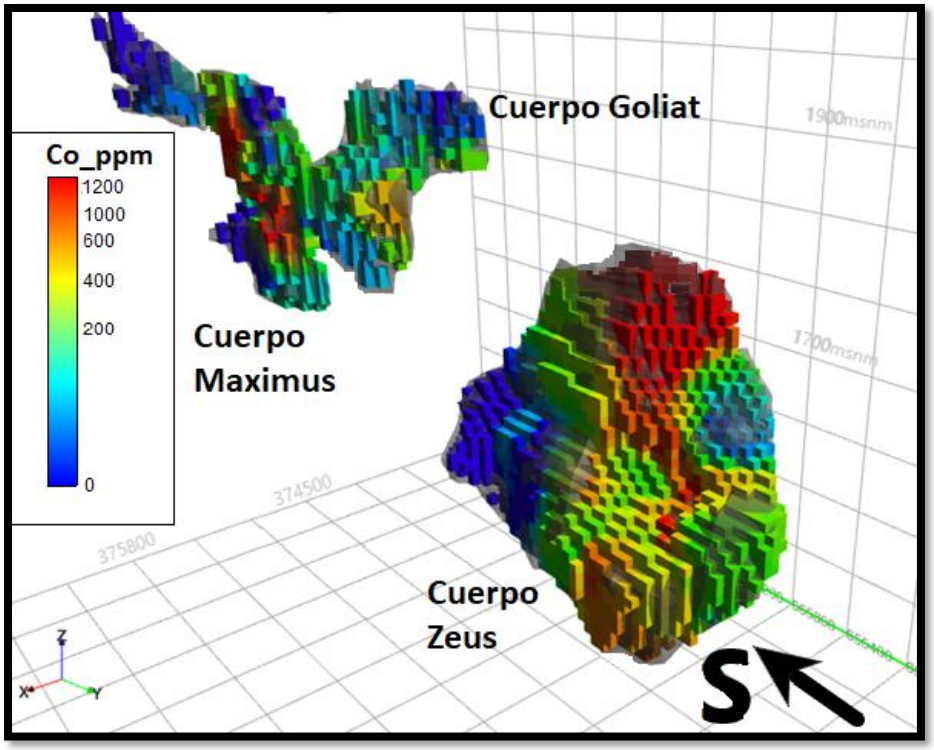


Figura 3-5: Modelo de bloques de los cuerpos mineralizados Zeus, Maximus y Goliat construido a partir de valores de cobalto usando Kriging ordinario, vista en dirección SW-NE. Fuente: El autor.



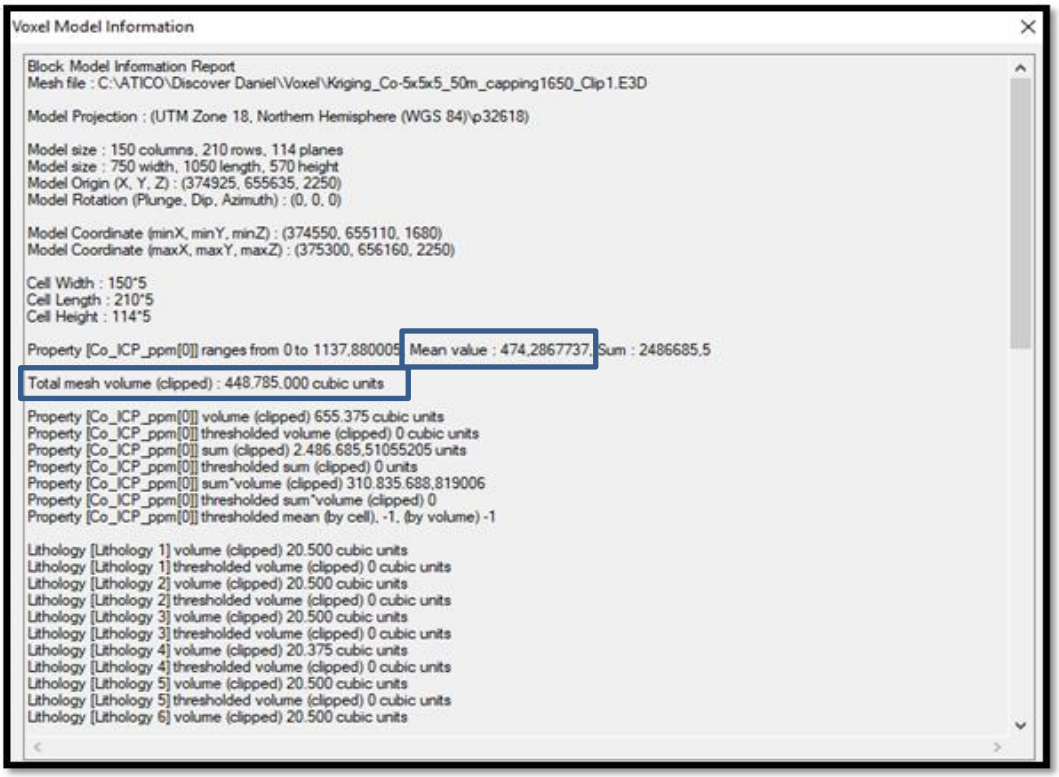
3.2 Cuerpo de mineral Zeus

Gran parte del objetivo de este trabajo consiste en definir los valores de cobalto para el cuerpo mineralizado denominado Zeus ya que sobre este se centran las proyecciones de producción a corto y largo plazo.

Aproximadamente 1´044.000 toneladas de Zeus (dilución incluida) han sido tratadas a la fecha desde el año 2015 por lo cual una cantidad significativa de los “residuos” de este cuerpo de sulfuro se encuentran asentados en las presas de relave del proyecto.

Como se puede observar en la Figura 3-5, gran porcentaje del cuerpo posee valores de cobalto in situ superiores a 400 ppm lo que consecuentemente indica una cantidad significativa de este metal; como ya se mencionó, de acuerdo con trabajos anteriores publicados por el servicio geológico británico y estadounidense (Hannis & Bide, 2009; Hitzman et al., 2017), concentraciones mayores o cercanas a 400 ppm en un depósito VMS estratiforme podrían considerarse importantes para catalogarlo como mena de cobalto de baja ley.

Figura 3-6: Información del Voxel (modelo de bloques de cobalto en este caso) del cuerpo Zeus a partir de los parámetros usados para su construcción. Fuente: El autor.



Teniendo en cuenta la información de la Figura 3-6 para los cerca de 448.785 metros cúbicos (volumen de material minable) interpolados en el modelo es posible asignar una ley media de cobalto; así; utilizando una densidad promedio de 3,5 ton/m^3 *in situ* calculada mediante pruebas hechas anteriormente en los núcleos de perforación del cuerpo mineralizado y empleando la Ecuación 2.2 se logra obtener un tonelaje, es decir, los recursos aproximados de cobalto en el cuerpo Zeus.

Teniendo en cuenta que:

Volumen x Densidad = Masa (2.2)

448.78 m^3 x 3,5 ton/ m^3= 1´570.747,5 toneladas con 474,28 ppm en promedio de Cobalto

Una vez el material es ingresado de la mina a la planta para ser flotado y concentrado, se obtiene un producto polimetálico final al cual no se le realizan análisis de detección de cobalto convencionalmente, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo, muestreos puntuales fueron llevados a cabo en 10 compósitos de muestra para posteriormente ser analizados por el laboratorio Berau Veritas (Perú) usando la técnica ICP-MS y cuyos resultados arrojaron valores promedio alrededor de 450 ppm lo cual indica que el cobalto no se concentra en el actual proceso de beneficio.

3.2.1 Asociación mineralógica

Una vez construido el modelo de bloques con base en los valores de cobalto presentes en el cuerpo Zeus se realiza una comparación gráfica (Figuras 3-7, 3-8, 3-9 y 3-10) y lineal entre estos datos con la mineralogía mapeada cada 40 metros en promedio (vistas en planta) con el fin de determinar posibles asociaciones mineralógicas-multielemento vinculando la cantidad de cobalto tanto *in situ*, como en el concentrado y en el relave con especies minerales presentes en el depósito. Lo anterior es importante ya que el residuo que va a la presa de relaves contiene calcopirita, pirita, pirrotina, magnetita y otros metales en menor proporción; por tanto, es importante conocer no solo la especie mineral de cobalto para este depósito sino su asociación mineralógica en aras de diseñar un método de concentración efectivo y económicamente viable en el tiempo.

Nota: Para la correlación con el mapeo hecho en interior mina se tienen en cuenta los niveles cartografiados con mayor información litológica y mineralógica manteniendo una distancia vertical entre uno y otro más o menos uniforme.

Figura 3-7: Vista en planta del cuerpo Zeus, nivel 1837. Arriba contenido de cobalto en ppm, abajo cartografía geológica escala 1:250. Fuente: el autor.

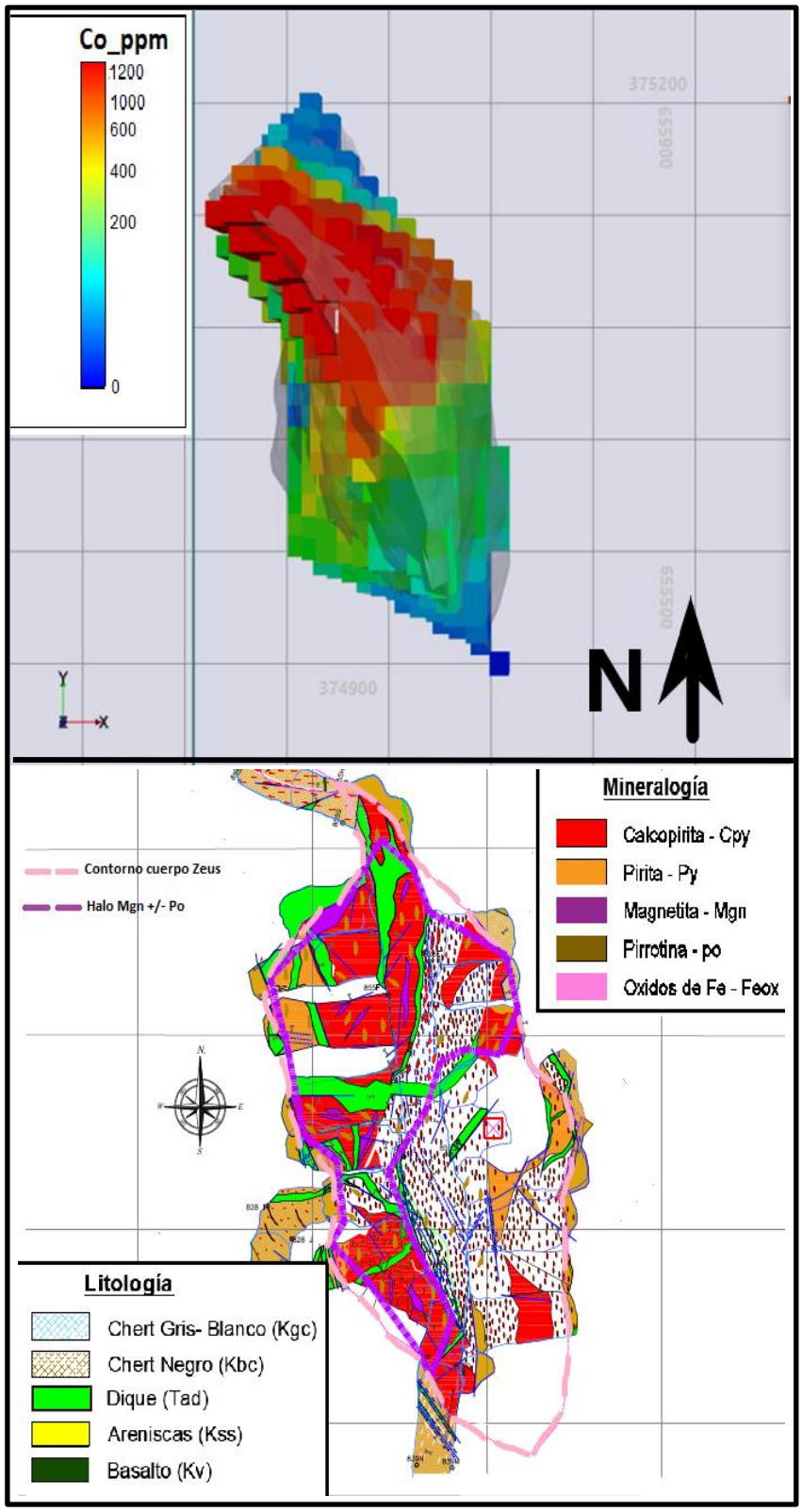


Figura 3-8: Vista en planta del cuerpo Zeus, nivel 1797. Arriba contenido de cobalto en ppm, abajo cartografía geológica escala 1:250. Fuente: el autor.

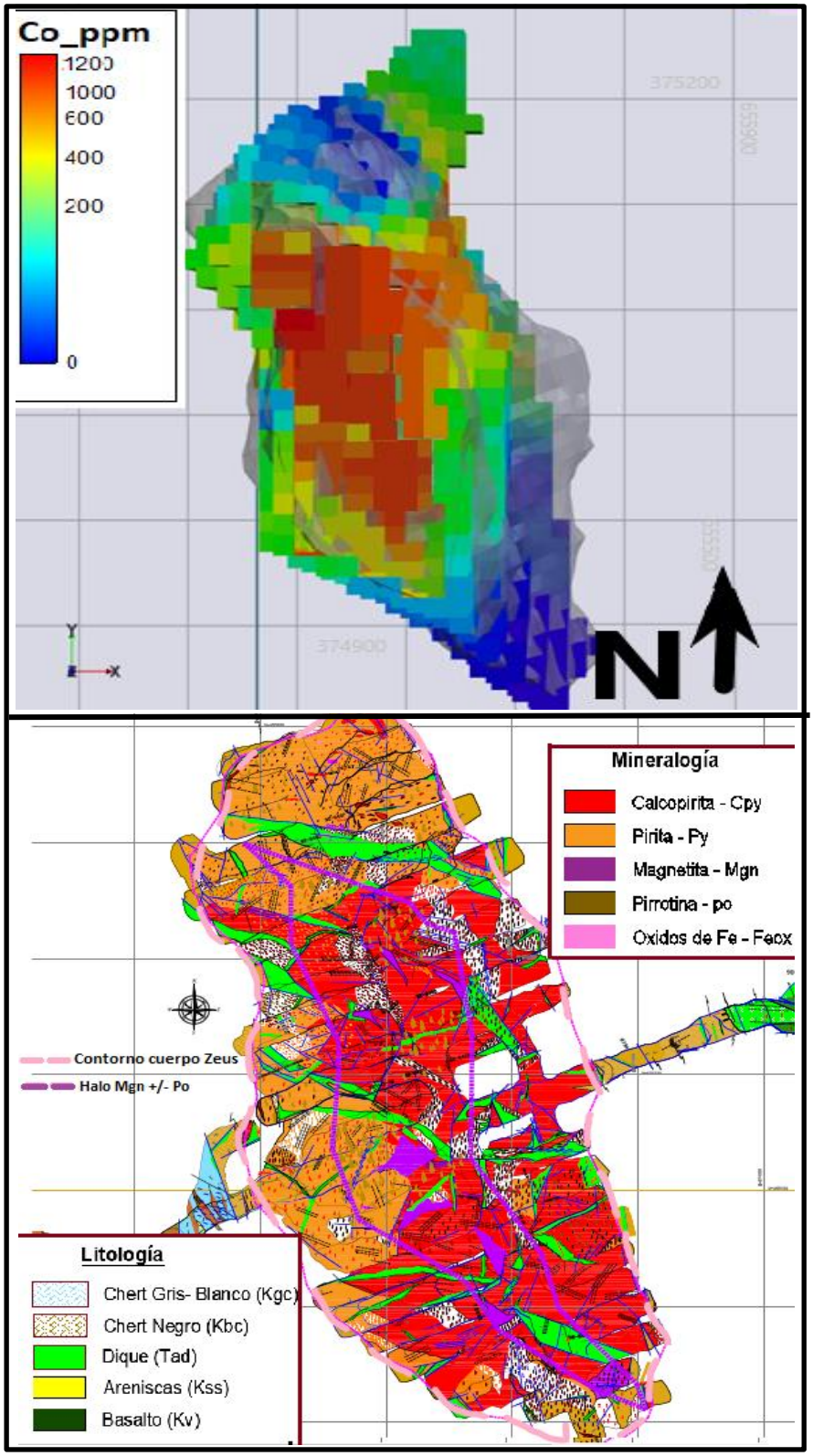


Figura 3-9: Vista en planta del cuerpo Zeus, nivel 1757. Arriba contenido de cobalto en ppm, abajo cartografía geológica escala 1:250. Fuente: el autor.

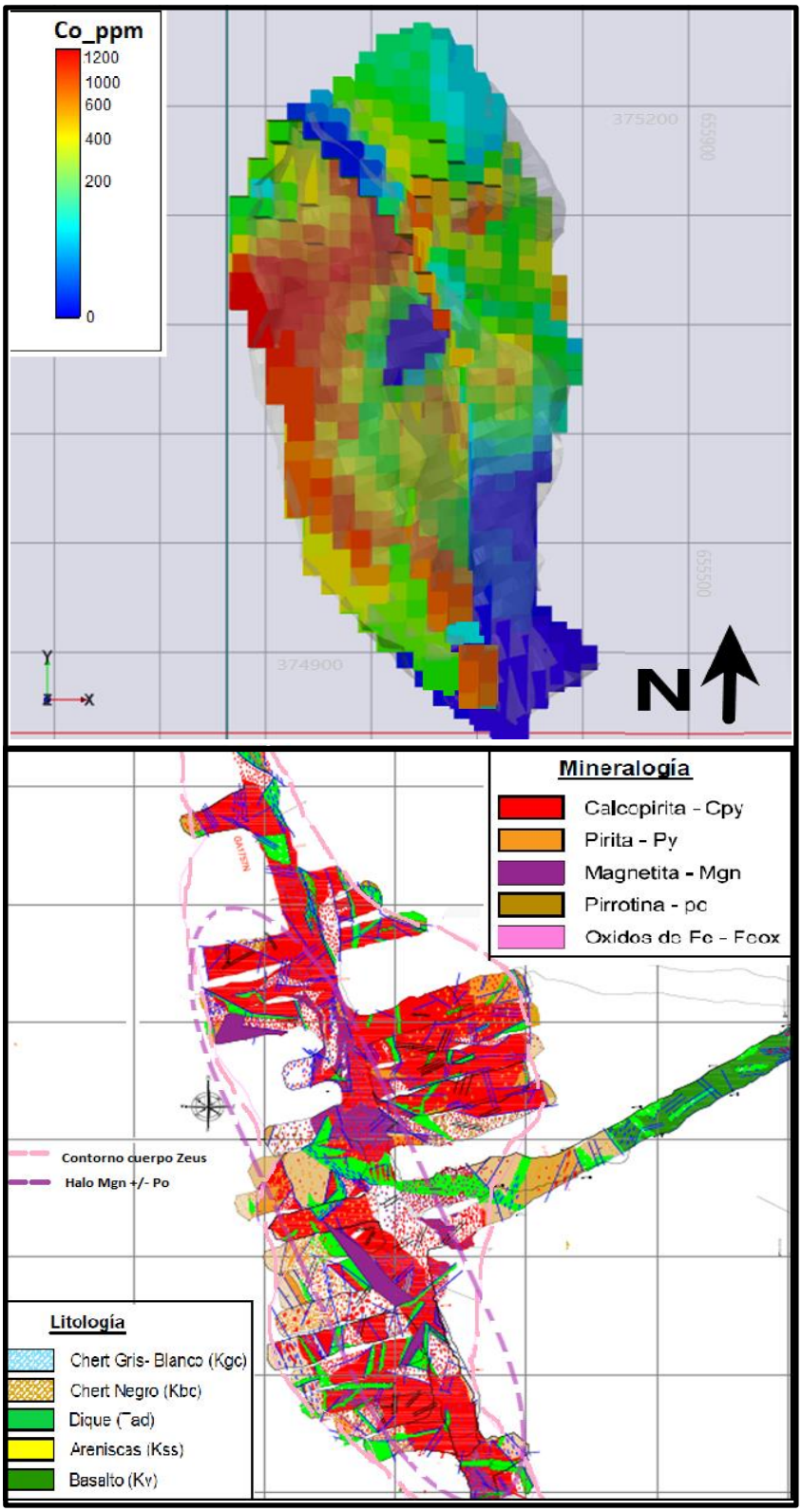
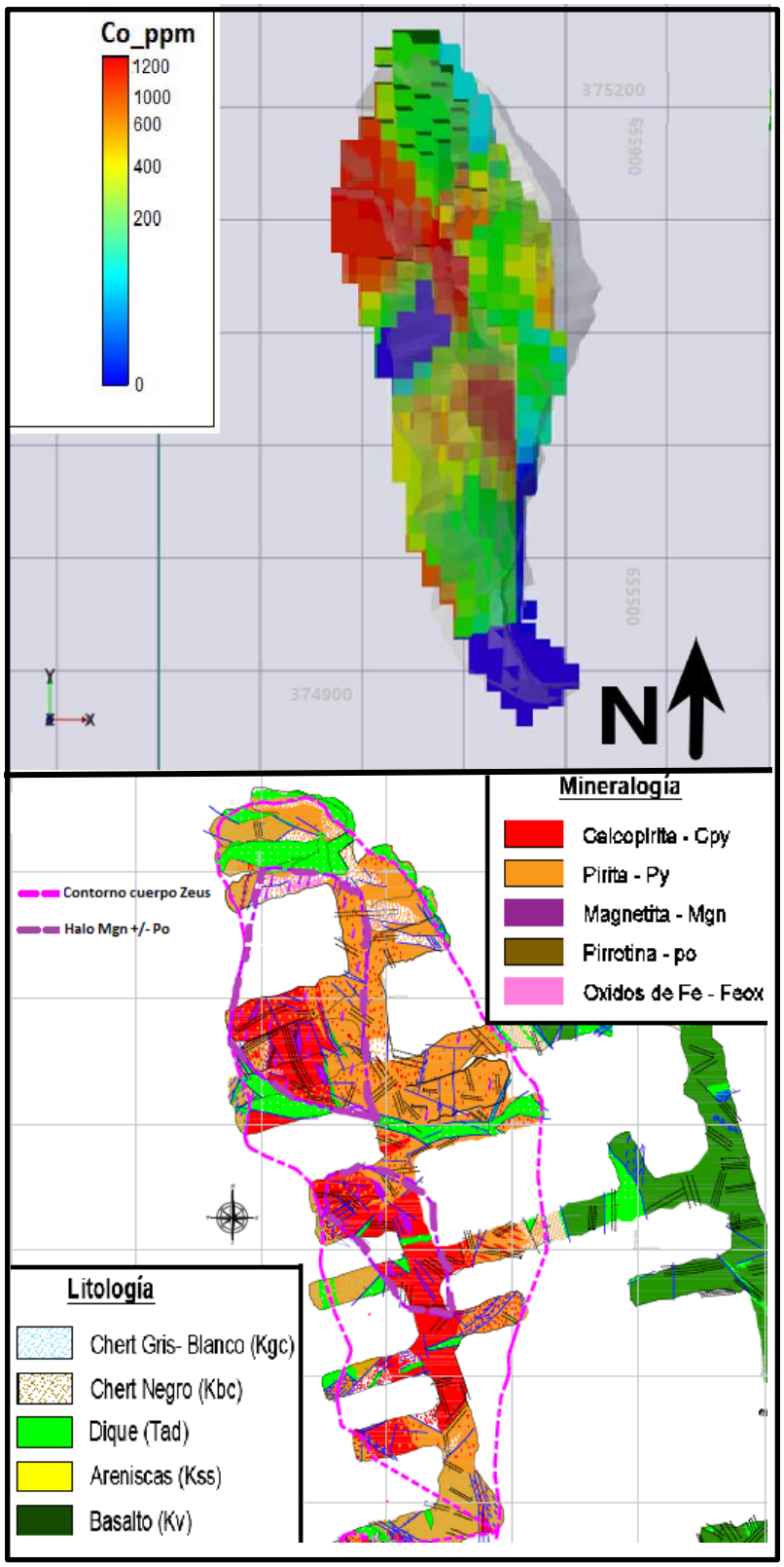


Figura 3-10: Vista en planta del cuerpo Zeus, nivel 1722. Arriba contenido de cobalto en ppm, abajo cartografía geológica escala 1:250. Fuente: el autor.



Si bien no hay una relación estequiométrica clara de cobalto con otros elementos se utilizaron correlaciones lineales entre este metal y algunos de los principales elementos metálicos presentes en los cuerpos de mineral (Figuras 3-12, 3-13 y 3-14), allí se observó una mayor afinidad de cobalto con el hierro como se expresa en la Tabla 3-1 lo cual concuerda con la relación cobalto-magnetita y cobalto+/-pirrotina evidenciada anteriormente en las plantas. Así, se podría interpretar que el cobalto está asociado principalmente a minerales ferrosos de alta temperatura de formación como magnetita (Fe_3O_4) pirrotina ($Fe_{(1-x)}S$) y eventualmente "pirita de alta temperatura" (FeS_2) señalados en azul en el modelo idealizado por Lydon en la Figura 3-11 (Lydon, 1984). Por tanto, comparando esto con el depósito canadiense *Windy Craggy* se puede interpretar que las asociaciones paragenéticas de cobalto en función de otros elementos metálicos son muy similares para ambos yacimientos lo que permite inferir que las especies minerales predominantes en el depósito El Roble puedan ser pirrotina cobaltífera, pirita cobaltífera o un sulfuro de cobalto como la cobaltita (CoAsS), tal como en *W. Craggy*. En vista que los estudios de difracción de rayos x (DRX) en las muestras de relave no arrojaron una especie mineral de cobalto precisa debido a la alta concentración del metal requerida para su detección e identificación difractográfica (>5-10%, dependiendo el equipo), la anterior interpretación es tenida en cuenta como contribución al diseño de un método de concentración metalúrgico de cobalto en la presa que pueda ser económicamente viable en el tiempo.

Figura 3-11: Lentes de sulfuro masivo idealizados ilustrando zonaciones características para minerales hipógenos modificado de Lydon, donde: Py = pirita, Po = pirrotina, Cpy = calcopirita, Sp = esfalerita, Gn = galena, Ba = barita (Lydon, 1984).

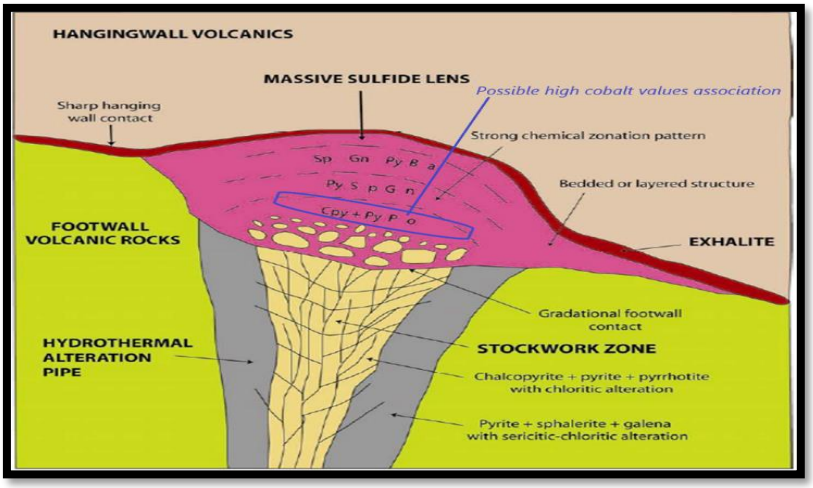


Figura 3-12: Correlación lineal entre valores de cobalto y hierro tomados de los sondajes diamantinos. Fuente: El autor.

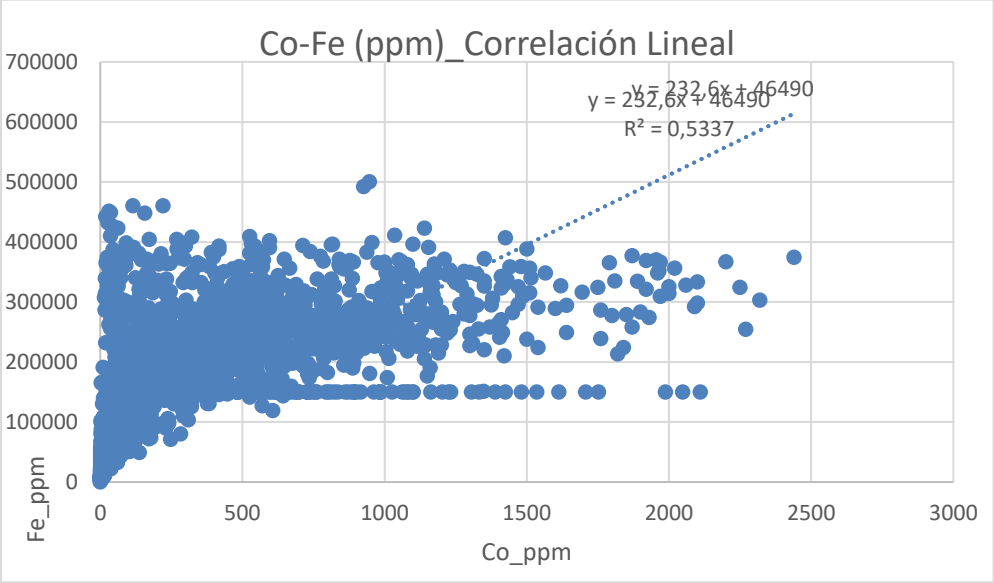


Figura 3-13: Correlación lineal entre valores de cobalto y cobre tomados de los sondajes diamantinos. Fuente: El autor.

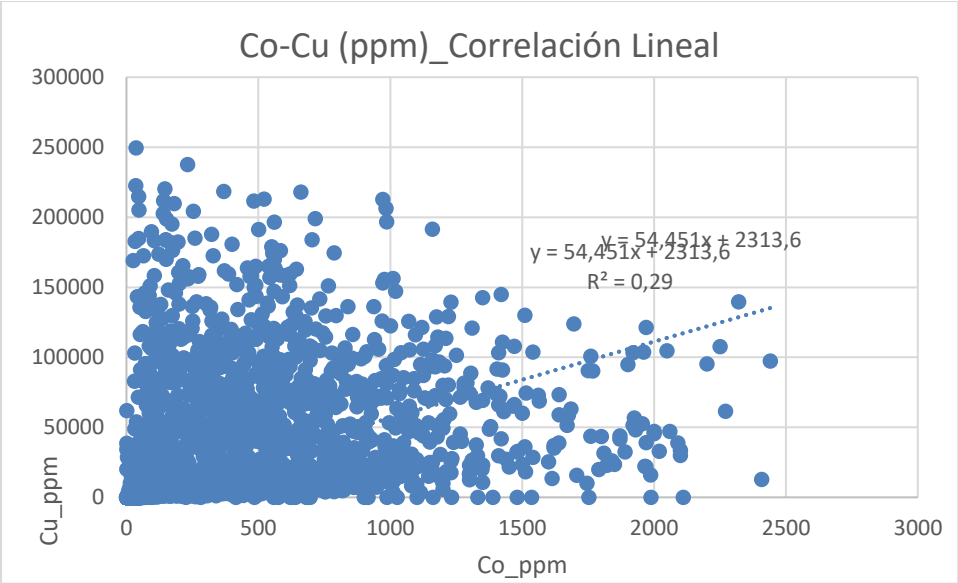
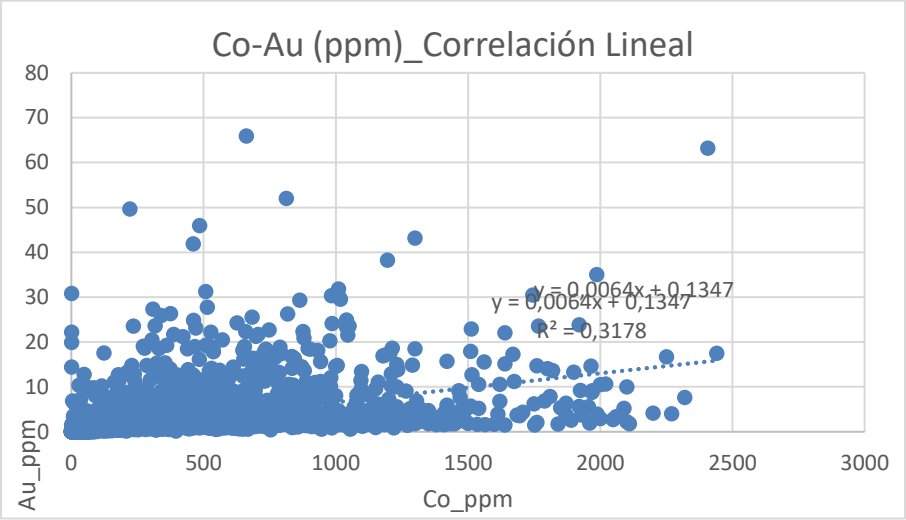


Figura 3-14: Correlación lineal entre valores de cobalto y oro tomados de los sondajes diamantinos. Fuente: El autor.



Calculando el coeficiente de correlación lineal de Pearson "R" a partir de lo anterior se tiene que:

Cobalto-Hierro

R^2 =0,5337: R= √0,5337 : **R= 0,7305**

Cobalto-Cobre

R^2 =0,290: R= √0,290 : **R= 0,5385**

Cobalto-Oro

R^2 =0,3178: R= √0,3178 : **R= 0,5637**

Tabla 3-1: Rangos numéricos entre 0 a 1 indicando coeficiente de relación lineal para un conjunto de variables, modificado de Pearson (1896).

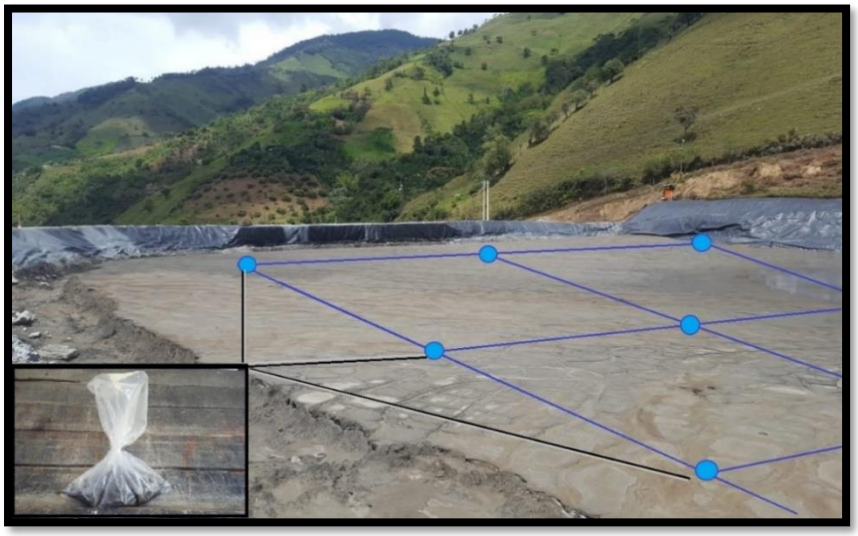
Rango		Relacion Lineal
±0,96	±1,0	Perfecta
±0,85	±0,95	Fuerte
±0,70	±0,84	Significativa
±0,50	±0,69	Moderada
±0,20	±0,49	Débil
±0,10	±0,19	Muy Débil
±0,09	±0,0	Nula

Fe
Cu
Au

3.2.2 Etapa de muestreo en presa de relaves

Se recolectaron un conjunto de 6 muestras a manera de compósito dentro de la presa de relaves número 4 (presa principal) dentro de las instalaciones del proyecto minero El Roble siguiendo una malla de puntos espaciada 20 m ancho x 20 m largo y usando herramientas manuales como “barreno muestreador tipo hand auger” el cual en este caso permitió extraer alrededor de 3 kilogramos de material por muestra con una profundidad cercana a 2 metros aproximadamente (ver Figura 3-15); cabe resaltar que esta es la máxima profundidad a la cual se logró muestrear debido a que el terreno es bastante lodoso lo que dificulta una apertura mayor del agujero una vez se excava por debajo de 1,8 metros.

Figura 3-15: Puntos de muestreo sobre presa de relaves y usando barreno tipo hand auger.



Una vez extraídas, las muestras se rotulan y envían al Instituto de Minerales CIMEX ubicado en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín con el fin de que le sean practicados análisis de detección multielemento como fluorescencia de rayos x (FRX); para este análisis se usó un equipo tipo Epsilon 1 de la compañía Malvern Panalytical como el observado en la Figura 3-16. Así mismo, se utiliza la siguiente codificación para numerar dichas muestras; por ejemplo, PR4-01 siendo:

PR4: Presa de relaves número 4

01: Consecutivo de la muestra

Figura 3-16: Equipo Epsilon 1 usado para análisis por fluorescencia de rayos X (tomado del sitio web de Malvern Panalytical Company).

Los resultados arrojados por los análisis preliminares de FRX utilizando la aplicación OMNIAN y teniendo en cuenta intensidades energéticas teóricas en la propagación de los rayos X sobre las muestras se llevan a cabo no solo para cobalto sino además para otros elementos como Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As y Sr (ver Tabla 3-2) evidenciando una cantidad particularmente significativa de cobalto de 2.195 ppm en promedio. En el mismo sentido, es remarcable la cantidad de otros metales analizados, por ejemplo, el cobre, el cual está presente en cantidades superiores a 0,3% lo cual es negativo en términos de ley de relave y recuperación trazados en el planeamiento minero para este proyecto (operativamente hablando).

También es de resaltar los altos valores de azufre y sílice obtenidos en el relave lo que se puede asociar al contenido masivo de sulfuros no flotados en la planta (p.e. pirita, pirrotina) además de una matriz de cuarzo en ellos, esta matriz representa entre el 10-15% total del material minable a tratar en el actual circuito de beneficio de El Roble.

Tabla 3-2: Valores multielemento preliminares obtenidos por FRX de las muestras tomadas en la presa de relaves. Fuente: El autor.

	Muestra (valores en %)					
	RELAVE INICIAL					
ELEMENTO	**PR4-01**	**PR4-02**	**PR4-03**	**PR4-04**	**PR4-05**	**PR4-06**
Mg	3,468	3,545	3,129	3,747	3,582	3,409
Al	2,587	3,295	2,643	2,503	3,228	2,62
Si	20,657	22,873	20,205	20,696	23,431	20,015
S	16,756	11,814	15,359	17,106	11,473	14,625
Ca	7,724	8,822	8,354	7,717	8,753	8,371
Ti	0,152	0,208	0,159	0,138	0,214	0,166
Mn	0,185	0,213	0,182	0,181	0,207	0,175
Fe	22,452	17,138	21,244	22,517	17,036	20,995
Co	**0,251**	**0,193**	**0,236**	**0,235**	**0,188**	**0,214**
Cu	0,484	0,34	0,607	0,489	0,346	0,628
Zn	0,188	0,112	0,216	0,174	0,137	0,243
Sr		0,029	0,023			
As			0,021			
K				0,505	0,817	0,573
Ni				0,174	0,013	0,014

3.3 Cuerpos de mineral Maximus y Goliat

Si bien la mayoría del material localizado en la parte superior de la presa de relaves principal del proyecto está conformada por las colas del cuerpo Zeus, existe otra cantidad asentada en el fondo que hace parte de los cuerpos de mineral Maximus y Goliat los cuales fueron explotados en su apogeo entre los años 2013 a 2017. Es por esto, que al igual que en Zeus se realizó una estimación de recursos de cobalto con base en la información geoquímica disponible de las perforaciones diamantinas como se muestra en la Figura 3-17.

Figura 3-17: Modelo de bloques de los cuerpos Maximus y Goliat teniendo en cuenta valores de cobalto en ppm, vista en dirección SW-NE. Fuente: El autor.

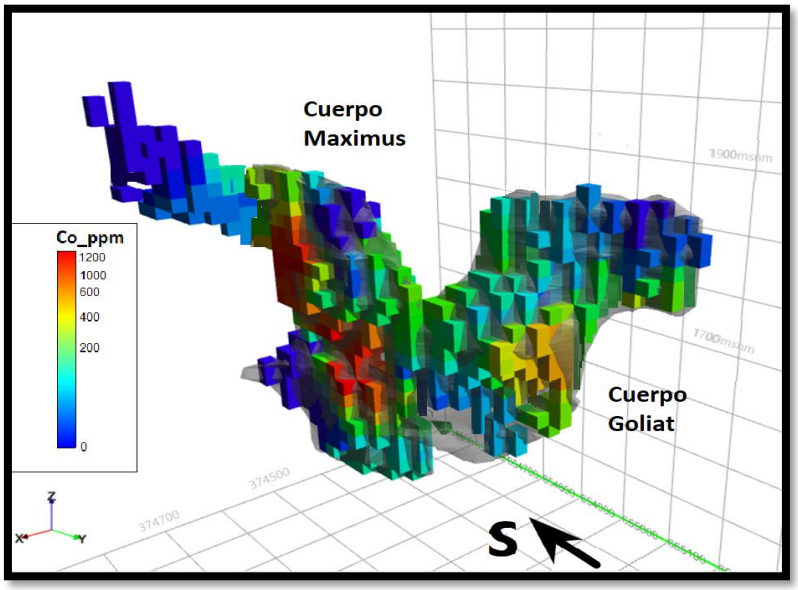
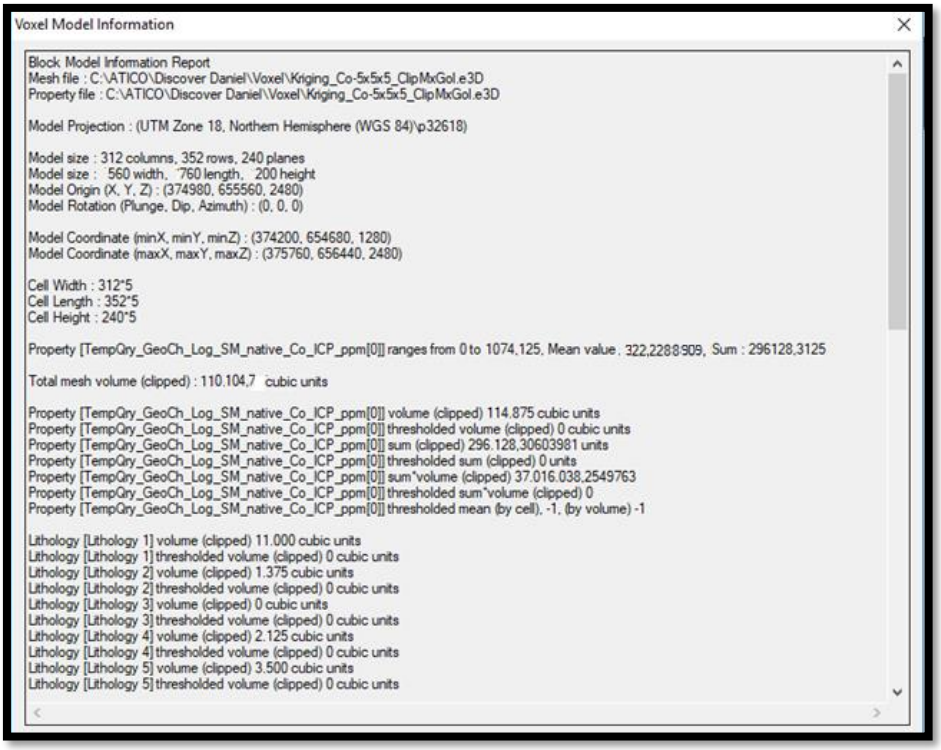


Figura 3-18: Información del *Voxel* (modelo de bloques de cobalto en este caso) de los cuerpos Maximus y Goliat a partir de los parámetros usados para su construcción. Fuente: El autor.



Voxel Model Information

```
Block Model Information Report
Mesh file : C:\ATICO\Discover Daniel\Voxel\Kriging_Co-5x5x5_ClipMxGol.e3D
Property file : C:\ATICO\Discover Daniel\Voxel\Kriging_Co-5x5x5_ClipMxGol.e3D

Model Projection : (UTM Zone 18, Northern Hemisphere (WGS 84)\p32618)

Model size : 312 columns, 352 rows, 240 planes
Model size :  560 width,  760 length,  200 height
Model Origin (X, Y, Z) : (374980, 655560, 2480)
Model Rotation (Plunge, Dip, Azimuth) : (0, 0, 0)

Model Coordinate (minX, minY, minZ) : (374200, 654680, 1280)
Model Coordinate (maxX, maxY, maxZ) : (375760, 656440, 2480)

Cell Width : 312*5
Cell Length : 352*5
Cell Height : 240*5

Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] ranges from 0 to 1074,125, Mean value : 322,2288909, Sum : 296128,3125

Total mesh volume (clipped) : 110.104,7  cubic units

Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] volume (clipped) 114.875 cubic units
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] sum (clipped) 296.128,30603981 units
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] thresholded sum (clipped) 0 units
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] sum*volume (clipped) 37.016.038,2549763
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] thresholded sum*volume (clipped) 0
Property [TempQry_GeoCh_Log_SM_native_Co_ICP_ppm[0]] thresholded mean (by cell), -1, (by volume) -1

Lithology [Lithology 1] volume (clipped) 11.000 cubic units
Lithology [Lithology 1] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
Lithology [Lithology 2] volume (clipped) 1.375 cubic units
Lithology [Lithology 2] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
Lithology [Lithology 3] volume (clipped) 0 cubic units
Lithology [Lithology 3] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
Lithology [Lithology 4] volume (clipped) 2.125 cubic units
Lithology [Lithology 4] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
Lithology [Lithology 5] volume (clipped) 3.500 cubic units
Lithology [Lithology 5] thresholded volume (clipped) 0 cubic units
```

Al igual que con el cuerpo Zeus teniendo en cuenta la información de la Figura 3-17 es posible estimar una concentración media de cobalto para los cerca de 110.104,7 metros cúbicos (volumen) interpolados en el modelo, por tanto, usando nuevamente la ecuación 2.2:

Volumen x Densidad = Masa

Entonces:

110.104,7 m^3 x 3,5 ton/ m^3 = 388.866,4 toneladas con 322,22 ppm en promedio de Cobalto

De acuerdo con lo anterior, el cobalto no se concentra significativamente una vez es tratado en el actual proceso de beneficio respecto a los cuerpos Maximus y Goliat. Cabe resaltar que de acuerdo los sólidos modelados las mayores concentraciones de cobalto en dichas zonas (explotadas casi en su totalidad) se encontraron en dirección noroeste al cuerpo Maximus y en este caso, asociadas puntualmente a algunas áreas con alta concentración de calcopirita y pirita sin seguir un patrón específico; esto, de acuerdo con la cartografía escala 1:250 hecha en interior mina cuando el área se encontraba en producción.

4. Modelo de concentración metalúrgico

4.1 Separación magnética

La siguiente etapa implicó una serie de pruebas de laboratorio con el fin de lograr identificar la metodología más efectiva para la concentración del cobalto potencialmente estimada en los relaves mineros. Así, y bajo la presunción de que dicho metal puede estar asociado a minerales magnéticos la primera etapa es llevar a cabo una separación magnética del "material crudo" como será mencionado en este trabajo, es decir, el relave sin ningún tipo de tratamiento posterior a su depositación en la presa principal del proyecto.

Para esto se utilizó un separar magnético el cual permitió seleccionar 3 productos como se señala en la Figura 4-1: uno magnético, uno paramagnético y uno no magnético, así mismo, se definieron variables para su calibración como velocidad de giro de disco (150 RPM) e intensidad magnética (0,75 Oersted/Gauss) basado principalmente en la asociación mineralógica del material la cual se especificó en la sección anterior. El proceso paso a paso se explica a continuación:

- Se secan los relaves en un horno que no supere los 100ºC para evitar alteraciones en la muestra.
- Si bien el material de relave tiene un tamaño de partícula pasante malla #200 este no está exento a formar grumos y rocas al momento de secarse, por lo que la muestra se debe conminuir de nuevo con un rodillo manual y ser tamizada para obtener una granulometría adecuada, en ese orden de ideas, el tamaño de partícula se trabaja finalmente pasante malla #80.
- Se pesa el material que cumple las anteriores condiciones y con el que se va a realizar la concentración magnética.
- Se realizaron inicialmente 5 pruebas diferentes con el mismo material, variando los parámetros de operación y basado en los estándares actuales para minerales como magnetita, pirrotina, pirita etc, para así poder determinar los valores que proporcionaban una mejor separación cuantitativa del material.

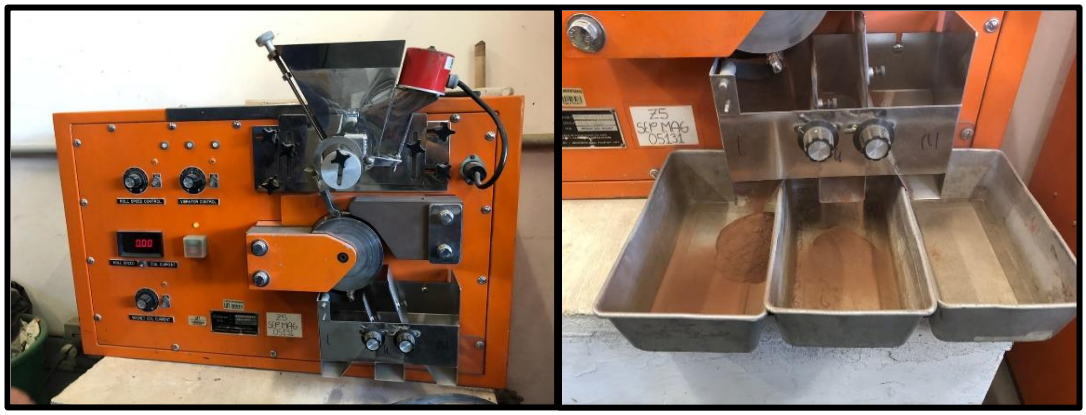
- Se definieron las variables con las que operarían todas las concentraciones posteriores, y se fijaron estos valores para las 5 muestras garantizando una homogeneidad en el material para cada prueba. Estas variables son una velocidad de giro del disco magnético de 150 RPM; y un campo de intensidad magnética del campo externo generado de 0.75 Oersted o 0,75 Gauss (en este caso) de acuerdo con los rangos asignados por Dobrin en 1988 para minerales como pirrotina y magnetita (Dobrin & Savit, 1988).
- Finalmente se tomaron 3 muestras de 670 gramos, y se pasaron por el separador magnético bajo los parámetros indicados. Se obtienen 3 productos; magnéticos (Mag), paramagnéticos (Paramag) y no magnéticos (No Mag), es decir, 9 muestras. Se pesa cada una y se lleva a análisis una cantidad no menor a 30 gramos.

Inicialmente se realiza un análisis por fluorescencia de rayos X para comprobar si el método fue efectivo o no, los resultados se muestran a continuación en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Valores químicos preliminares del relave separado magnéticamente dados por fluorescencia de rayos X. Fuente: El autor.

	RELAVE LUEGO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA (%)								
ELEMENTO	**1Mag**	**1No Mag**	**1Paramag**	**2Mag**	**2No Mag**	**2Paramag**	**3Mag**	**3No Mag**	**3Paramag**
Mg	3,751	3,455	3,772	3,86	3,184	3,953	3,815	3,49	3,697
Al	3,069	3,203	3,172	3,182	2,595	3,104	3,266	2,936	3,035
Si	22,267	23,106	22,76	22,296	23,474	23,824	22,638	23,55	24,144
S	11,879	11,505	11,817	11,795	9,482	12,391	12,097	11,264	12,617
Ca	0,215	8,92	9,078	8,811	8,378	8,841	8,588	9,353	8,887
Ti	0,213	0,22	0,264	0,216	0,166	0,193	0,23	0,179	0,184
Mn	0,206	0,205	0,214	0,216	0,186	0,204	0,212	0,209	0,197
Fe	17,58	15,309	16,399	18,241	10,045	15,87	19,403	13,37	16,139
Co	**0,205**	**0,174**	**0,185**	**0,211**	**0,118**	**0,186**	**0,223**	**0,152**	**0,191**
Cu	0,352	0,327	0,35	0,348	0,29	0,315	0,363	0,32	0,307
Zn	0,127	0,16	0,119	0,121	0,129	0,119	0,114	0,136	0,116
Sr	0,027	0,028	0,029	0,028	0,028	0,029	0,028	0,028	0,026
As	0,031	0,041	0,029	0,024	0,013	0,021	0,025	0,015	0,02
K	0,781	0,805	0,798	0,807	0,767	0,776	0,794	0,774	0,762
Ni									
Cl	0,215	0,229	0,189	0,232	0,247	0,237	0,22	0,229	0,203
Zr	0,016	0,061	0,104		0,024		0,032	0,017	

Figura 4-1: Separador magnético usado para pruebas de separación, laboratorio CIMEX. Fuente: El autor.



Los resultados arrojados en la Tabla 4-1 si bien son coherentes con el modelo planteado en este trabajo, es decir, aumenta contenido de cobalto en las muestras magnéticas y paramagnéticas, estos no evidencian un incremento significativo en su concentración total, razón por la cual se procede a realizar el mismo ensayo, pero llevando a cabo un proceso de tostación anterior a la separación. En cuanto a los contenidos de hierro, sílice y azufre tampoco se observó una variación significativa en los valores con los diferentes ensayos por lo que se interpreta que la separación magnética no fue lo suficientemente selectiva.

4.2 Tostación

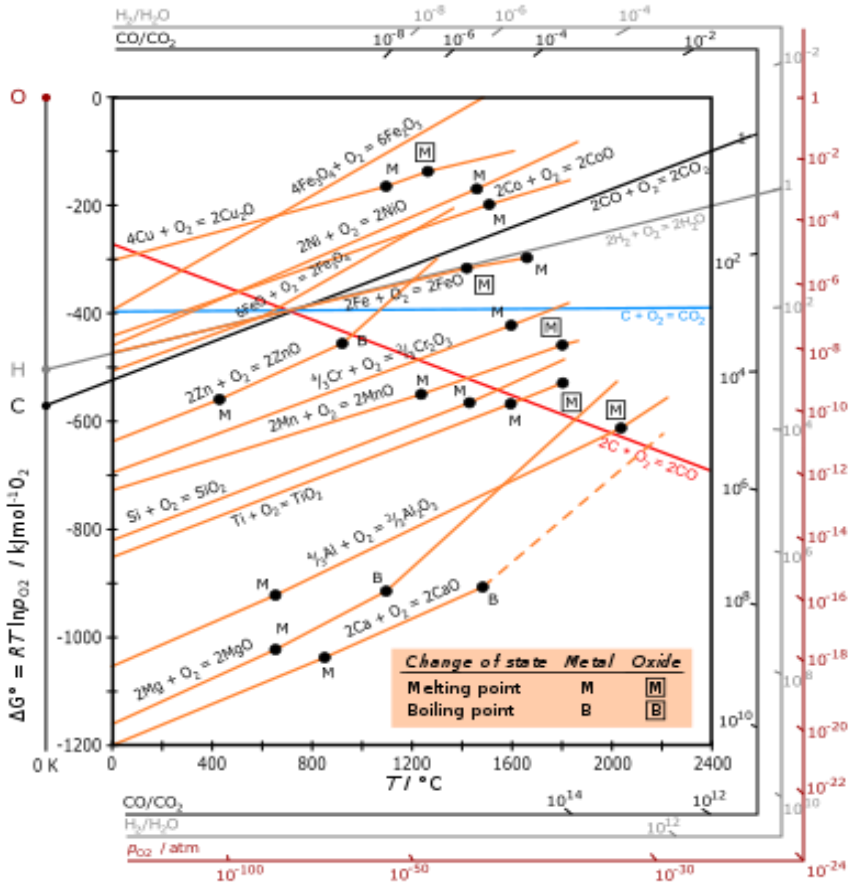
La tostación consiste en una transformación química del material a altas temperaturas, la cual tiene por objetivo remover los sulfuros presentes en los minerales de interés, convirtiéndolos en una mezcla de óxidos y sulfatos solubles denominada calcina, y obteniéndose SO_2 como subproducto (Ellingham, 1944). Los metales de interés se oxidan parcialmente, es decir, no alcanzando su máximo estado de oxidación. Esto se logra restringiendo el suministro de oxígeno en el equipo y controlando la temperatura de operación (Güntner & Hammerschmidt, 2012). Así, se utilizó un horno con una capacidad de temperatura máxima de trabajo de 900ºC el cual cuenta con 4 contenedores cada uno albergando 60 gramos de material. El proceso paso a paso de esta actividad se explica a continuación:

- El procedimiento de preparación de la muestra es exactamente igual a como ya se mencionó antes de iniciar la tostación, así, se calienta gradualmente el horno hasta

llegar a los 900ºC durante 1 hora y se deja enfriar durante unos 15-20 minutos; esto para garantizar la reacción completa en la tostación oxidante del material.

- Para garantizar una tostación sulfatante se sigue el mismo paso anterior salvo que la temperatura se sube máximo hasta los 700ºC de acuerdo con los diagramas de fases de Ellingham (1944) expresados en la Figura 4-2.
- Una vez seco, se tomó una muestra inicial de 240 gramos y se llevó al separador magnético. Se notó que toda la muestra se magnetiza en general; dejando así, bajo los mismos parámetros mencionados en la sección anterior, un porcentaje mínimo en el recipiente del material “no magnético” (cuya cantidad difícilmente alcanza para análisis químico).
- Se pesa cada recipiente y se toma una muestra de cada uno para análisis químico.

Figura 4-2: Diagrama de Ellingham de varios metales que producen la energía libre para formación de óxidos y la correspondiente presión parcial de oxígeno en el equilibrio. Fuente: Modificado de Ellingham 1944.



4.3 Flotación

En aras de optimizar la concentración del cobalto en los relaves, se planteó como método alternativo realizar 5 ensayos de flotación variando principalmente el tipo de colector, y la presencia o no de activadores y depresantes como se observa en la Tabla 4-2; lo anterior usando las instalaciones e insumos disponibles en el instituto de minerales CIMEX.

Inicialmente se planteó usar como colector principal Xantato isopropílico de sodio (Z-11) y algunos de los colectores Danafloat (068,069 y 070) con base en tiosulfato de cobre ya que, si bien es más lenta la cinética de flotación en los sulfuros de cobalto, su selectividad en un medio neutro-básico es más favorable (Danafloat™, 2011; Reactivos nacionales S.A. – RENASA., 2006). Infortunadamente, para estos *tests* no fue posible encontrar todos los reactivos mencionados en la literatura y en el tiempo estipulado para la entrega de este trabajo por lo que no se descarta realizar también dichas pruebas en el mediano plazo.

Dependiendo de la mineralización del cobalto, en este caso, asumiendo que se asocia a un sulfuro (ver sección 2.2.1. Asociación mineralógica), el uso de un activador como sulfato de cobre puede suministrar una metalurgia mejorada cuando está flotando con una combinación de xantato y ditiofosfato a un pH de 8-9 (Danafloat™, 2011). Sin embargo, como ya se mencionó, se ha utilizado otro colector primario, el Aerofloat 208 conformado por sal sódica de di (etil-sectubil) ditiofosfato ya que según su ficha técnica al igual que el xantato isopropílico de sodio posee una alta capacidad de selectividad contra o para los los sulfuros de hierro y en la concentración de minerales secundarios lixiviados del proceso de beneficio del cobre, como pueda ser el cobalto posiblemente para el caso de estos relaves mineros (Hawley, 1983 en Distribuidora de Químicos Industriales S.A., 2010).

Los depresores son reactivos que impiden la flotabilidad de un mineral, esto se logra previendo la adsorción del colector sobre la superficie del mineral. Según información obtenida se ha reportado que alrededor del 70% de los minerales en las colas o arenas cianuradas constituyen la fracción liviana o ganga. Esta fracción está compuesta principalmente de cuarzo (50%) y silico-aluminatos alcalinos de hierro (25%) por lo que se suele utilizar un depresor como el silicato de sodio (Romero & Jasmany, 2018).

Las cantidades de espumantes que se dosifican en el proceso de flotación depende del tipo de mineral a ser tratado. El espumante aerofroth 65 es un producto sintético y no es un alcohol, lo que significa que es un espumante soluble en agua utilizado en la flotación

tanto de minerales metálicos como no metálicos con la ventaja de ser soluble en agua en todas las proporciones (Perez, 2012).

Tabla 4-2: Resumen de las variables utilizadas en los ensayos de flotación. Fuente: El autor.

Tipo reactivo	Ensayo #				
	1	2	3	4	5
Regulador de pH	-	CAL (0,6 g)	CAL (0,8 g)	CAL (0,85 g)	CAL (0,85 g)
Activador	-	-	Sulfato de cobre (0,15 g)	Sulfato de cobre (0,15 g)	Sulfato de cobre (0,15 g)
Colector primario	AERO 208 (1 gota)	AERO 208 (1 gota)	AERO 208 (2 gotas)	AERO 208 (1 gota)	AERO 208 (1 gota)
Colector secundario	-	-	-	AEROFLOAT 31 (1 gota)	AEROFLOAT 31 (1 gota)
Depresante	Silicato de sodio (1 gota)	-	-	-	Silicato de sodio (1 gota)
Espumante	Aceite de pino (2 g)	AEROFROTH 65 (5 gotas)	AEROFROTH 65 (9 gotas)	AEROFROTH 65 (9 gotas)	AEROFROTH 65 (9 gotas)
Observaciones	Pese a que se observo una espuma de color metálico, no era estable. Espumante no recomendado.	El espumante demostró ser mucho mejor, pero tenia un aspecto más sucio, indicando flotación de ganga probablemente.	La espuma tenia una buena consistencia, y aspecto metálico, pero se pudo notar el cambio de color en la espuma rapidamente, indicando que se consumio todo el metal o el colector, probablemente	Espuma de aspecto metálico y buena contextura, sin embargo la espuma se oscurese rápidamente.	La espuma tenia una gran consistencia, además duro más tiempo con aspecto metálico. Gran cantidada de espuma.
Cantidad de relaves humedos (g)	300,0	375,0	602,0	562,0	574,8
Humedad promedio (%)	16,9	16,9	16,9	15,5	12,9
Peso en seco de relaves	249,3	311,6	500,3	474,9	500,7
Cantidad de agua (ml)	750,0	1000,0	1500,0	1500,0	1500,0
Concentración de pulpa (%)	33,2	31,2	33,4	31,7	33,4
Tiempo de homogenización	5 min	20 min	20 min	20 min	20 min
Tiempo entre reactivos	5 min	10 min	10 min	10 min	10 min
Tiempo de flotación	2 min	4 min	4 min	4 min	3 min
pH	6	8-9.	8-9.	8-9.	8-9.
RPM promedio	1000	1000	900	900	950
RPM flotación	1200	1200	1500	1400	1100

La tabla anterior resume los ensayos realizados y las condiciones de trabajo, a continuación, se explicará paso a paso el desarrollo de cada actividad:

- Se estableció una relación sólidos/líquido constante. Esto basado en el poder colector del reactivo utilizado, el peso y tipo de muestra.

- Con el fin de tener mediciones acertadas de los reactivos necesarios en cada flotación se trabaja en seco.
- Se trabajó con una máquina de flotación tipo Denver (ver Figura 4-3) con dos tamaños de celda de 1 y 2 litros, así que la cantidad de material y reactivo dependía del tipo de celda, siempre con una concentración de 30% en sólidos.
- En la celda se añadió el agua y el material correspondiente, y se procedió a mezclar por 20 minutos, esto se conoce como tiempo de homogenización.
- Se aplicó el activador (en caso de haberlo) o directamente el colector. En el caso del activador, se trató de sulfato de cobre al 10% p/v, utilizando una relación de 300 gramo/ tonelada de mineral.
- Una vez aplicado el activador, se dejó mezclar por 10 minutos para asegurar que todas las partículas entraran en contacto con el reactivo, así, se aplicó el colector posteriormente. En el caso del colector, se utilizaron 2 tipos: Aerofloat 208 y Aerofloat 31, ambos en una relación de 25 gramos/ tonelada de mineral. Cabe resaltar que cuando fue necesario usar ambos reactivos, se dividió la cantidad total en 2 partes iguales.
- Después de que el colector primario actuó por 10 minutos, se procedió a agregar el colector secundario (cuando se necesitó) y se dejó actuar por 10 minutos más.
- Al finalizar este tiempo, se aplicó el depresante en los ensayos que así lo contemplaban, y se dejó actuar por otros 10 minutos. En este caso se trabajó con silicato de sodio a una relación de 15 gramos/ tonelada de mineral.
- Finalmente, se aplicó el espumante, que, para todos los casos, excepto el primero, se trató del aerofroth 65, por las mejores características y consistencia que presentó la espuma. Este se usó en una relación de 5 gotas/ litro de pulpa y se dejó actuar por 10 minutos.
- Una vez que acababa de mezclarse el espumante, se procedió a aumentar la velocidad de agitación y abrir la válvula de aire, lo que dio lugar a la formación de burbujas que buscaban atrapar el material de interés hidrófobo. Estas empezaron a rebosar y se recolectaron en bandejas. El tiempo de flotación dependió de la observación, es decir, se detuvo una vez que se empezó a notar unas espumas más sucias, que indicaban flotación de ganga y no de metal.
- Las colas, es decir, el material depresado, se pusieron en otra bandeja y también se llevaron al horno de secado, donde no se superó los 100ºC durante el proceso.

- Una vez seco, se procedió a pesar el concentrado y las colas, tomando muestras para análisis multielemento de las 3 pruebas más favorables y así poder ver la efectividad del proceso de flotación, es decir, los ensayos número 3, 4 y 5 de acuerdo con la Tabla 4-2.

Figura 4-3: Máquina de flotación tipo Denver utilizada para las pruebas, laboratorio CIMEX. Fuente: El autor.

4.4 Resultados a partir de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

Probablemente el análisis por ICP-MS sea el método de detección más preciso que existe para analizar de forma cuantitativa casi todos los elementos de la tabla periódica que estén presentes en concentraciones muy bajas, incluyendo partes por trillón (ppt) de acuerdo al sitio web de Thermo Fisher Scientific, compañía que provee este tipo de instrumentación científica y servicios a nivel industrial; por tanto, se contempló llevarlo a cabo en este proyecto para estar seguros con respecto a los análisis previos hechos por fluorescencia

de rayos X. El análisis por ICP-MS fue realizado por el laboratorio Berau Veritas con sede en Lima-Perú. Se escogieron estratégicamente un conjunto de muestras de acuerdo con los *tests* metalúrgicos explicados en las secciones anteriores[2] (Tabla 4-3) analizando a su vez un amplio *set* de 58 elementos con el fin de identificar otras posibles anomalías significativas en el ámbito económico. Los resultados químicos de estos ensayos experimentales se resumen a continuación en la Tabla 4-4:

Tabla 4-3: Muestras escogidas para análisis de ICP-MS a partir de pruebas metalúrgicas. Fuente: El autor.

Código de muestra	Tipo de ensayo hecho en el relave
R1	Concentración Magnética simple_MATERIAL NO MAGNÉTICO
R2	Concentración Magnética simple_MATERIAL MAGNÉTICO
R3	Concentración Magnética post-tostación oxidante (900ºC) _MATERIAL MAGNÉTICO
R4	Concentración Magnética post-tostación oxidante (900ºC) _MATERIAL PARAMAGNÉTICO
R5	Concentración Magnética post-tostación sulfatante (700ºC) _MATERIAL MAGNÉTICO
R6	Relave solo con tostación oxidante (900ºC) _SIN SEPARACIÓN MAGNÉTICA
R7	Flotación ensayo # 5_COLAS
R8	Flotación ensayo # 5_CONCENTRADO
R9	Flotación ensayo # 4_COLAS
R10	Flotación ensayo # 4_CONCENTRADO
R11	Flotación ensayo # 3_COLAS
R12	Flotación ensayo # 3_CONCENTRADO

Tabla 4-4: Resultados geoquímicos obtenidos mediante análisis por ICP-MS a partir de pruebas metalúrgicas. Fuente: El autor.

Method	WGHT	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250
Analyte	Wgt	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Ga	Gd
Unit	kg	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MDL	0.01	0.02	100	0.2	1	1	0.04	100	0.02	0.02	0.2	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	100	0.02	0.1
R 1	0.13	3.81	19000	122.8	28	<1	0.34	38606	3.51	8.82	439.0	18	1.3	2790.5	1.2	0.7	0.5	194911	7.40	1.4
R 2	0.12	4.29	20805	127.7	35	<1	1.29	42292	3.39	9.00	453.7	19	1.5	3066.5	1.5	0.7	0.6	199960	7.85	1.6
R 3	0.12	16.47	23845	304.9	39	<1	1.48	49858	5.36	11.27	438.1	31	1.8	3649.2	1.6	0.8	0.7	199960	9.93	1.8
R 4	0.03	12.78	30115	212.9	50	<1	0.88	43262	3.61	11.96	221.5	30	1.8	3230.1	1.5	0.7	0.6	119168	9.56	1.7
R 5	0.16	6.09	20140	424.7	30	<1	1.48	46754	4.69	8.82	551.7	25	1.4	3587.8	1.5	0.7	0.6	237326	8.84	1.6
R 6	0.04	9.45	37430	120.8	88	<1	0.47	46366	2.43	10.58	95.0	27	1.7	4242.0	1.6	0.8	0.6	58675	10.03	1.8
R 7	0.15	2.57	20900	173.3	28	<1	0.21	56260	2.49	8.64	177.4	42	1.6	3884.3	1.4	0.7	0.5	90891	8.40	1.6
R 8	0.40	6.96	1178	172.3	13	<1	0.52	11737	7.11	1.49	10291.0	15	0.2	7605.0	0.3	0.1	0.2	382752	2.49	0.4
R 9	0.12	2.59	21945	112.9	26	<1	0.24	51992	2.17	8.34	184.2	20	1.9	2933.6	1.5	0.8	0.5	89477	8.13	1.8
R 10	0.08	6.65	1207	185.1	10	<1	0.67	8691	7.85	1.27	10588.4	15	0.2	7093.9	0.3	0.2	0.1	400930	2.14	0.3
R 11	0.02	3.15	20700	83.8	53	<1	0.60	48706	2.76	8.96	295.7	29	1.8	1786.0	1.6	0.8	0.5	135000	7.40	1.7
R 12	0.03	8.10	6508	241.6	18	<1	0.84	13871	7.24	3.39	9687.2	19	1.0	4712.2	0.7	0.4	0.3	369623	3.93	0.8

[2] Nota: Muestras de material “no magnético” post-tostación a escala laboratorio no alcanzaron los 30 gramos el cual es el peso mínimo requerido para análisis multielemento.

Tabla 4-4: Resultados geoquímicos obtenidos mediante análisis por ICP-MS a partir de pruebas metalúrgicas. Fuente: El autor.

Method	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250
Analyte	Ge	Hf	Ho	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	Rb	Re
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MDL	0.05	0.02	0.1	0.01	100	0.1	0.1	0.1	100	1	0.05	10	0.04	0.1	0.1	10	0.02	0.1	0.1	0.002
R 1	0.41	0.26	0.2	0.15	4113	5.1	26.6	<0.1	18870	1000	11.66	3940	1.02	7.4	30.3	460	47.12	1.5	13.9	0.042
R 2	0.32	0.35	0.3	0.16	4536	5.5	29.3	<0.1	21624	1119	12.64	4253	1.03	7.9	32.5	507	52.87	1.6	14.5	0.045
R 3	0.19	0.27	0.3	0.19	5076	7.0	32.5	<0.1	24888	1327	14.90	4655	1.31	9.3	40.5	595	258.39	2.0	17.2	0.026
R 4	0.22	0.32	0.3	0.13	6759	7.5	36.1	<0.1	20706	1059	8.76	6929	1.45	8.3	28.2	624	350.46	1.9	21.7	0.023
R 5	0.50	0.23	0.3	0.18	4122	5.6	23.9	<0.1	24378	1337	15.19	3861	1.05	8.3	39.7	525	266.31	1.6	13.0	0.062
R 6	0.08	0.34	0.3	0.11	8640	6.5	37.1	<0.1	21114	1148	5.60	9388	1.53	7.7	17.2	654	325.71	1.7	27.3	0.016
R 7	0.11	0.30	0.3	0.15	4914	5.4	31.4	<0.1	26520	1535	8.68	4087	1.13	6.7	29.8	512	15.29	1.5	17.4	0.039
R 8	0.29	0.03	<0.1	0.28	261	1.2	2.5	<0.1	5753	352	17.93	161	0.09	1.6	39.3	103	47.62	0.3	0.9	0.031
R 9	0.11	0.29	0.3	0.12	5292	6.1	34.0	<0.1	25602	1386	10.88	3949	1.30	7.2	25.4	549	16.24	1.5	18.8	0.045
R 10	0.34	0.04	<0.1	0.26	277	1.1	2.2	<0.1	5539	258	22.15	126	0.13	1.5	50.1	108	50.99	0.3	0.9	0.041
R 11	0.22	0.30	0.3	0.10	5130	6.3	32.4	0.1	24990	1352	14.60	3681	1.51	7.8	32.9	640	40.32	1.6	18.8	0.046
R 12	0.29	0.12	0.1	0.23	1476	2.5	15.4	<0.1	10914	364	32.05	629	0.50	3.8	59.1	231	55.84	0.7	4.9	0.057

Method	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250	4A250
Analyte	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MDL	400	0.02	0.1	0.3	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.05	0.1	10	0.05	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.2
R 1	>100000	27.46	3.8	27.6	1.8	0.4	141	<0.1	0.2	1.19	1.0	855	1.85	<0.1	2.9	84	1.0	6.7	0.5	1080.0
R 2	>100000	30.40	4.4	32.2	2.0	1.3	155	0.1	0.2	1.42	0.8	1010	1.99	0.1	3.4	96	1.0	6.8	0.6	1100.0
R 3	43228	54.53	5.5	4.7	2.3	0.8	186	<0.1	0.3	1.40	0.9	1148	1.42	0.1	3.5	116	1.8	8.3	0.6	1210.0
R 4	30401	33.63	5.6	3.7	2.0	0.6	222	0.1	0.2	0.99	1.0	1208	1.60	<0.1	2.4	106	1.1	7.6	0.6	931.0
R 5	92415	28.31	5.4	27.6	2.2	0.7	166	0.1	0.2	1.05	0.6	1148	1.81	<0.1	3.2	111	1.2	7.2	0.6	1380.0
R 6	24644	17.20	5.6	3.5	1.7	0.5	281	0.1	0.3	0.53	0.8	1307	1.56	0.1	1.9	106	1.2	8.2	0.7	743.0
R 7	57671	23.75	5.0	13.7	1.7	0.5	168	<0.1	0.2	0.57	0.8	1020	1.06	0.1	3.6	105	1.8	7.6	0.6	677.0
R 8	>100000	43.61	0.2	31.8	0.4	0.1	21	<0.1	<0.1	2.03	<0.1	82	3.51	<0.1	4.5	28	0.3	1.3	0.1	2390.0
R 9	69185	27.84	4.5	13.5	1.7	0.5	176	<0.1	0.2	0.75	1.0	1079	1.06	0.1	3.0	107	1.4	7.9	0.7	572.0
R 10	>100000	74.58	0.3	56.6	0.4	0.1	17	<0.1	<0.1	3.07	<0.1	96	3.25	<0.1	3.3	26	0.3	1.5	0.1	2730.0
R 11	>100000	29.80	6.0	30.4	1.9	0.6	184	0.1	0.2	1.42	0.9	1178	1.41	0.1	2.9	112	1.4	9.3	0.7	661.0
R 12	>100000	145.80	1.2	44.9	1.0	0.3	43	<0.1	0.1	3.60	0.2	340	3.26	<0.1	3.3	57	0.7	3.4	0.3	1980.0

De acuerdo con los resultados arrojados por el análisis de ICP-MS, el cobalto en el relave incrementó levemente su presencia una vez se realizó el proceso de concentración magnética, así como se observa en las muestras R2, R3 y R5 de la Tabla 4-4 lo que concuerda parcialmente con lo planteado en este trabajo, es decir, una relación (en este caso leve) de cobalto con minerales ferromagnéticos como pirrotina y magnetita. Sin embargo, en aras de buscar un beneficio de este material a escala industrial se tendría que optimizar en mayor medida su concentración. Adicionalmente, las pruebas de flotación usando aerofloat 208 como colector primario y aerofloat 31 como colector secundario evidenciaron una importante concentración de cobalto en las muestras R8, R10 Y R12 lo cual deja la puerta abierta a continuar realizando ensayos de flotación con diferente tipo de reactivos que como ya se mencionó podrían mostrar una mayor eficiencia metalúrgica en este metal (Danafloat™, 2011; Reactivos nacionales S.A. – RENASA., 2006).

Cabe resaltar que no solo el cobalto mostró valores significativos, algunos elementos como la plata se concentran en una cantidad alrededor de 16,5 gramos/tonelada que si bien aún no llega a ser económicamente extraíble a mayor escala muestra una relación directa con el proceso de tostación oxidante ya sea con o sin separación magnética como se observa en las muestras R3, R4 y R6 sometidas a temperaturas alrededor de 900ºC.

Así mismo, como se ve en las muestras R8, R10 y R12 el hierro presenta valores muy elevados (cerca al 40%) que, si bien puede corresponder a sulfuros mayormente, por ejemplo, pirrotina+pirita+/-calcopirita también contiene óxidos de uso industrial como magnetita y hematita. Para este caso se dio un proceso inverso en la flotación donde los minerales de hierro presentaron mayores valores en el concentrado y no en las colas como convencionalmente se esperaría. A su vez, la muestra R6, sin separación magnética y tostada a 900ºC evidenció el menor valor de hierro lo cual se podría explicar como una menor presencia de minerales ferrosos en ese compósito particularmente.

Con respecto al cobre, en las muestras analizadas se llegaron a tener concentraciones alrededor de 0,76% lo cual es incluso mayor a la ley de cabeza que registran algunas plantas de procesamiento actualmente en otros lugares del mundo. Esto se evidenció principalmente en las muestras R8 y R10 correspondientes a las pruebas de flotación del material no depresado (o concentrado) lo que significa que los reactivos aerofloat 208 como colector primario, aerofloat 31 como colector secundario y además del uso de silicato de sodio como depresante, producen una flotación más favorable para el cobre presente en los relaves mineros.

Elementos menores que generalmente no se transan en la bolsa de metales como selenio (ver Tabla 4-5) se encuentran en este caso por encima de los valores estándar en las muestras que no se sometieron a tostación oxidante, alrededor de 40 ppm; según Kesler, las reservas conocidas de selenio en estos depósitos normalmente no superan los 10 ppm y son producidas en mayor medida como subproducto de la fundición (refinamiento) de concentrados de cobre (Kesler, 1994). Así mismo ocurre con el Telurio cuya concentración recuperada de las menas de cobre está convencionalmente entre 1,5 a 3 ppm (Andersson, 2000) tal como se evidencia en los relaves del proyecto El Roble y cuyos resultados se han presentado anteriormente en la Tabla 4-4.

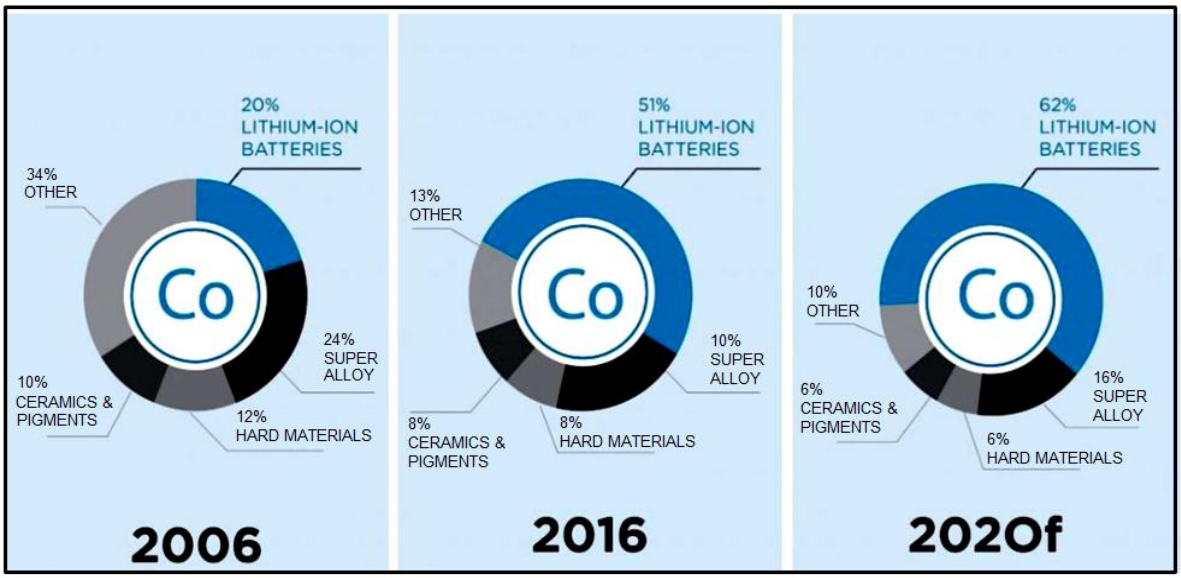
5. Análisis económico de factibilidad

5.1 Oferta y demanda de cobalto en el mundo

5.1.1 Demanda

Las expectativas en cuanto a la proyección del consumo de cobalto se basan principalmente en la expansión de la industria de vehículos eléctricos y la demanda de baterías ión-litio, la cual se estima que será aproximadamente el 60% de la demanda total de cobalto para el 2020, representando un aumento del 58% desde 2016. La demanda total de cobalto excederá la cifra de 120.000 toneladas anuales para 2020 (Darton Commodities Limited, 2016). En la Figura 5-1 se muestra el continuo crecimiento del uso del cobalto en baterías de ión-litio por sobre las otras aplicaciones en los últimos años.

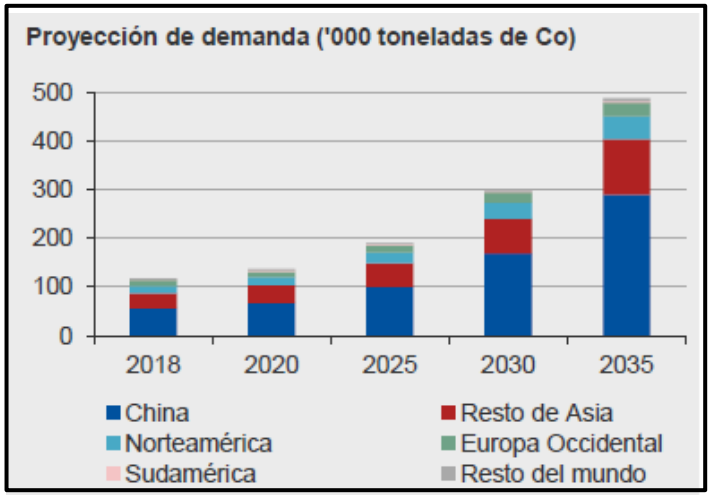
Figura 5-1: Evolución del mercado del cobalto en los últimos años (Global Energy Metals Corp, 2020).



Dentro de los principales consumidores del producto final, están los productores de tecnologías de teléfonos, como Apple, o fabricantes de automóviles eléctricos, como Tesla o Volkswagen (Joint Research Centre (JRC), 2018). Apple, uno de los mayores consumidores de cobalto, a principios de 2018 reportó que está en conversaciones con respecto a la transparencia de la fuente de mineral que utilizan en sus productos, así como los temas sobre las operaciones ilegales y su relación con la explotación infantil que se vive en países como el Congo, mayor productor de cobalto en el mundo. Actualmente, la Bolsa de Metales de Londres —London Metal Exchange (LME)— no tiene normativa específica que rija el origen de la materia prima utilizada en la producción de cobalto, por lo que está adoptando procedimientos para investigar la fuente del metal para un abastecimiento apropiado (The Financial Times Limited, 2018).

Como ya se mencionó, la proliferación masiva de baterías de litio y de los dispositivos electrónicos portátiles han contribuido al crecimiento sustancial en la demanda de cobalto. Del mismo modo, de acuerdo con la UPME, se espera que la producción química de cobalto para uso en baterías de litio concentrada en China, Corea del Sur y Japón ofrezcan la gran mayoría del aumento en la demanda como se proyecta en la Figura 5-2. Adicionalmente, se estima que la demanda de China aumente a una tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC) del 10.2% en el periodo 2018-2035, mientras que el resto de Asia a una TCAC del 7.9% para el periodo proyectado, mientras que los fuertes planes de órdenes para aviones comerciales apoyen la demanda de cobalto en las regiones de Norteamérica y Europa (CRU Consulting_UPME, 2018).

Figura 5-2: Proyección de la demanda de cobalto al año 2035 (CRU Consulting_UPME, 2018).



5.1.2 Oferta

Más del 98% del cobalto que se produce se obtiene como subproducto de la minería del níquel o del cobre (Figura 5-3). La República Democrática de Congo (RDC) como ya se mencionó, contiene más del 60% de las reservas mundiales de cobalto, junto con Zambia; estos son los únicos países con una producción de cobalto como subproducto de cobre. El resto de los países produce cobalto como subproducto de la minería del níquel. Los fundamentos económicos de las minas de cobre y de níquel son críticos para la oferta futura de cobalto. Según la UPME se espera que La República del Congo entregue la vasta mayoría de la producción de cobalto, con un crecimiento a una TCAC del 6.9% para el periodo 2018-2035 como se proyecta en la Figura 5-4. Debido a que es una pieza central en la producción de baterías, algunos productores de baterías se han integrado verticalmente para asegurar un suministro a largo plazo de cobalto (CRU Consulting_UPME, 2018).

Figura 5-3: Producción global de cobalto por tipo de mineral en 2017, dado en toneladas. Fuente: CRU_UPME 2018.

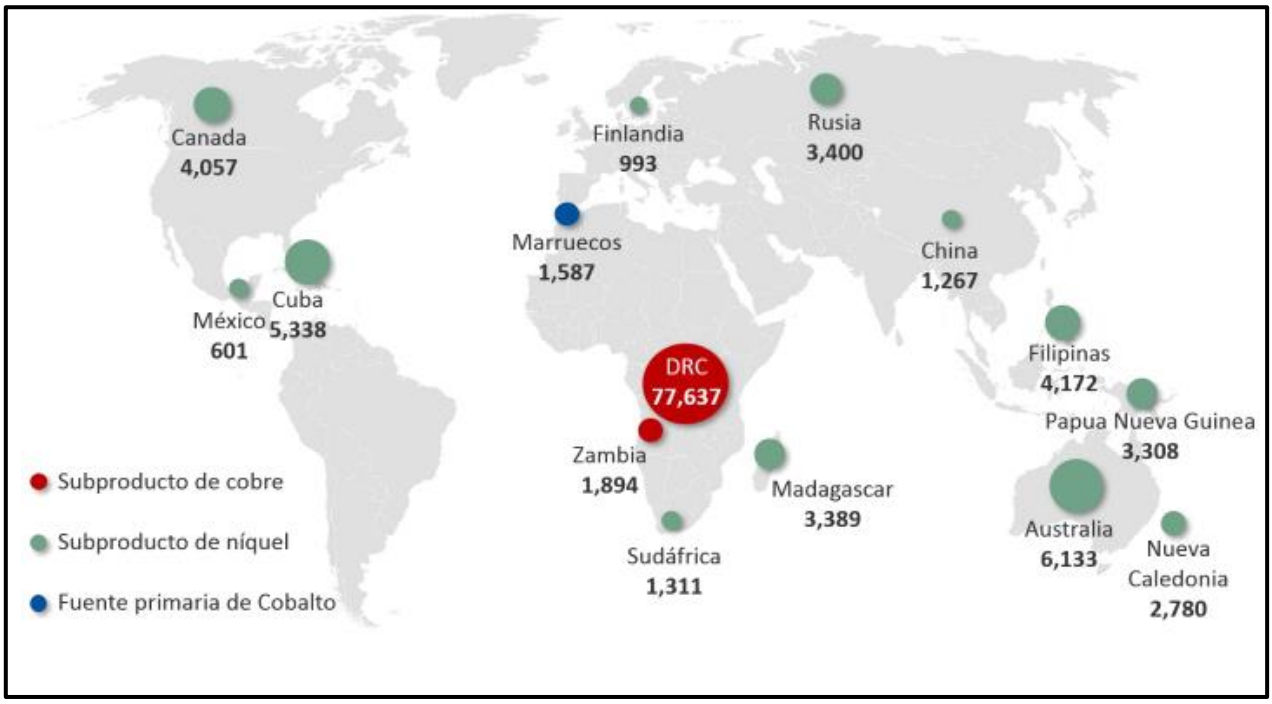
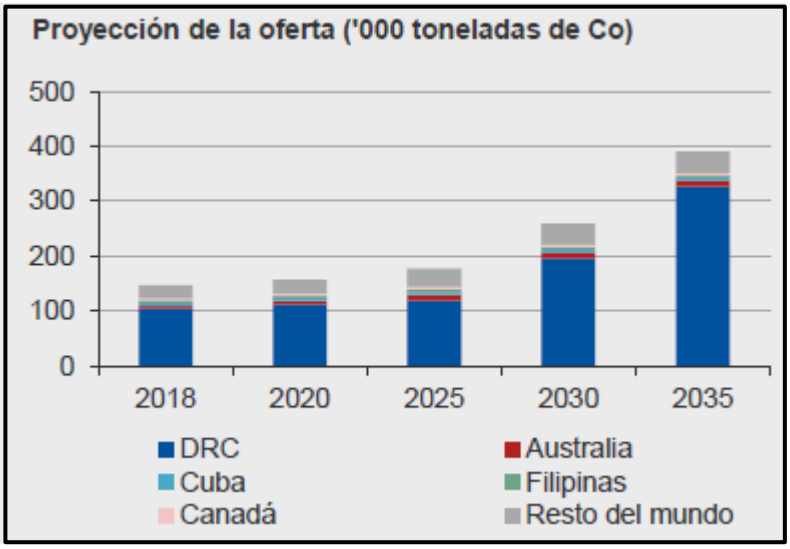


Figura 5-4: Proyección de la oferta de cobalto al año 2035 (CRU Consulting_UPME, 2018).



5.1.3 Precio en el mercado

El cobalto se maneja como un *commodity* dentro de la categoría de los metales, al ser un recurso natural con un valor y un bajo nivel de diferenciación o especialización. Se transa en la bolsa de metales de Londres (LME) desde principios del 2010, su precio es citado normalmente en USD/lb y la calidad mínima del metal que se comercializa es de 99,80% Co (CRU_UPME 2018).

Como se observa en la Figura 5-5, en 2017 los precios del cobalto aumentaron por temor a una escasez de oferta y en anticipación a las proyecciones de una producción fuerte de vehículos eléctricos. Sin embargo, de acuerdo con sitios web como Investment Mine.com, posterior al alza súbita que tuvo el precio del cobalto en 2017 (lo que conllevó a mayor demanda) se originó como consecuencia, una interrupción en la adquisición del metal por parte de los principales compradores (fabricantes de baterías, por ejemplo) en 2018 y 2019 producto de un supuesto *overstock* o “sobreabastecimiento”. Según la UPME se espera que los precios se mantengan estables a alrededor de USD 40/lb en precios reales como se observa en la Figura 5-6; además, que surja un ligero déficit para 2025 que incentivaría el desarrollo de tecnologías de reciclaje de baterías, resultando así en una mejor oferta de cobalto. Finalmente, para 2031 se espera que la tecnología de reciclaje haya sido ampliamente implementada, por lo que los precios empiecen a caer hasta alcanzar las USD 33/lb en 2035 (CRU_UPME 2018).

Figura 5-5: Fluctuación en el precio del cobalto a partir de los últimos 5 años desde enero de 2015 a agosto de 2019, revisado en abril de 2020 (Glacier Rig LTD_Investment Mine, 2020).

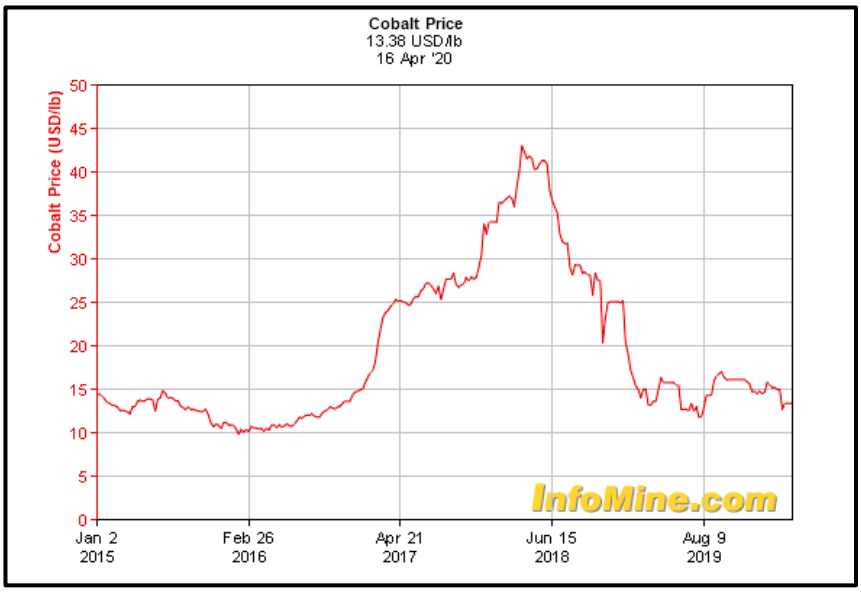
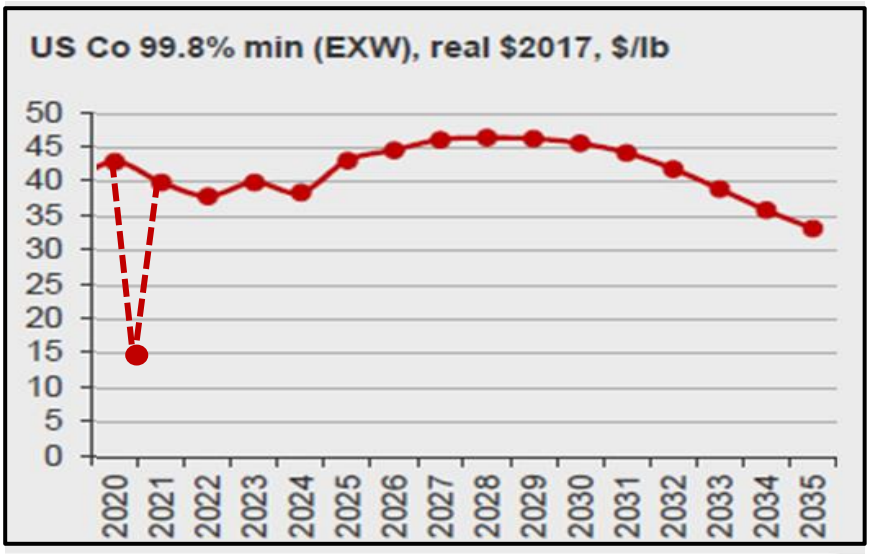


Figura 5-6: Proyección del precio de cobalto entre 2020 a 2035 (modificado de CRU_UPME 2018). En lineas rojas discontinuas se muestra el precio a la fecha**.**



5.2 Evaluación económica

En vista de que los valores de cobalto observados en los relaves, una vez hechas las pruebas metalúrgicas no alcanzaron los valores comerciales mínimos deseables, es decir, valores del orden de 5-15% de concentración de cobalto (CRU Consulting_UPME, 2018), se descartó para este escenario realizar un cálculo de índices como VAN, TIR, análisis de sensibilidad etc., ya que resultaría infructuoso. Sin embargo, este ejercicio fue hecho para las actuales condiciones del circuito de beneficio de El Roble a partir de la creación de un caso de estudio limitado a supuestos asumiendo una línea alternativa en el proceso de flotación respecto a los reactivos utilizados para la concentración del cobre (como *commodity* primario) en aras de lograr también un concentrado de cobalto como *commodity* secundario de manera aceptable para su comercialización siendo posteriormente refinado en China o Finlandia como hidróxido grueso tal como se ha llevado a cabo en otras proyectos mineros de acuerdo a lo mencionado por la CRU_UPME (2018).

Según lo encontrado en este trabajo, el contenido de cobalto tanto de los relaves mineros como en el concentrado final del actual circuito de beneficio en planta no excede en promedio los 500 ppm, sin embargo, es considerado un *commodity* potencialmente explotable con los reactivos adecuados como ya se mencionó. Así, se asumió una flotación selectiva con reactivos como xantato isopropílico de sodio, aerofloat 208 y danafloat 068, con costos marginales menores supeditados.

Los productos de venta se limitan a un concentrado de cobre-cobalto prescindiendo de procesos como fundición y electro-obtención (refinación). De la misma forma el precio de venta depende únicamente a la ley del concentrado que se tenga por lo que se trabajó bajo el supuesto de la recuperación y ley de concentrado de cobalto (ya que el del cobre se conoce).

Respecto al pago de mineral, se asumió una tarifa de compra para el cobalto, esta tarifa aplica siempre y cuando la ley de concentrado de cobalto sea igual o superior al 5% por lo que se consideró como bono al contenido de cobre, no como mineral primario como tal. El costo capital (CAPEX) se valoró en 1 periodo desde el desarrollo del proyecto. Con base en una asunción de inversión, para el primer año se apuntó un costo inicial base de 5 millones de dólares, justificando así la adecuación de una posible celda extra de flotación y el costo de los nuevos reactivos para 4 años como danafloat 068 (de mayor precio en el mercado) y xantato isopropílico de sodio. En adición con xantato amílico de potasio

(actualmente usado) además, incluyendo costos estimativos como ingeniería de pre-factibilidad, factibilidad, instalación y puesta en marcha de la adecuación a la planta.

En la Tabla 5-1 se muestran los valores idealizados con los que trabajaría este circuito de flotación selectivo tomando a su vez como referencia algunos de los valores del beneficio actual (que han sido parcialmente modificados para dar cumplimiento a las políticas de privacidad de la compañía).

Tabla 5-1: Valores económicos idealizados para el desarrollo del proceso alterno de beneficio. Fuente: El autor.

Parámetro	Unidad	Valor	
		Cu	Co
Capacidad de la planta	Tonelada/mes	23.000	
Mantenimiento	Tonelada/mes	6.000	
Ley de entrada "cabeza"	%	3,5	0,05
Ley de concentrado	%	22	5
Recuperación	%	95	80
Precio de venta	USD/ton	5.600	50.000
Finos/mes	Toneladas secas/mes	888	175
Finos/año	Toneladas secas/año	10.656	2.100
Concentrado	Toneladas secas/mes	3.500	3.500
Precio del concentrado	USD/ton	1.421	2.500
Ingreso mensual	MUSD/mes	1,26	0,43
Ingreso anual	MUSD/año	15,14	5,25
Ingreso anual + Au equivalente	MUSD/año	33,15	5,25
Costos de procesamiento (total planta)	USD/mes	306.000	25.000
Costos de operación (OPEX)	MUSD/mes	1,27	0,05
Costos de tratamiento	USD/mes	316.000	40.000
Costos anuales	MUSD/año	22,75	1,44

Cabe aclarar que los precios de concentrados se determinaron con base en el precio promedio anual de los últimos años y la ley permisible de venta (2,5 USD/lb Cu y 20 USD/lb Co aproximadamente). La ley del concentrado de cobalto usada fue la mínima asignada por la CRU_UPME para comercialización (5%) obviando los resultados químicos obtenidos de las pruebas metalúrgicas hechas en este trabajo para dar un orden de magnitud. Para el OPEX se consideró un incremento anual de 1% desde el año 2021 que repara en

depreciación, desgaste de equipos, contratación de personal, compra de mayores insumos, aumento en distancias de transporte, etc. Para el cálculo de las toneladas secas del concentrado de cobalto se tuvieron en cuenta las Ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 formuladas a continuación, además de una humedad del 4%:

$$\frac{Contenido\ metal}{ton\ proces} = 1000\left[\frac{kg}{t}\right] \cdot ley\ metal\left[\frac{\%}{100}\right] \tag{5.1}$$

$$\frac{finos}{ton\ proces} = \frac{Contenido\ \text{metal}}{ton\ proces}\left[\frac{kg}{t}\right] \cdot recuperación\left[\frac{\%}{100}\right] \tag{5.2}$$

$$ton\ concen = \frac{finos}{ton\ proces}\left[\frac{kg}{t}\right] \cdot \frac{ton\ min}{ley\ concen\left[\frac{\%}{100}\right]} \cdot \frac{1}{1000}\left[\frac{t\ fino}{kg\ fino}\right] \tag{5.3}$$

Posteriormente se realiza el cálculo de los ingresos tomando como referencia la Ecuación 5.4:

$$Ingreso = Precio\left[\frac{USD}{t}\right] \cdot ton\ concen \tag{5.4}$$

Cabe resaltar que los costos operacionales unitarios pre-tratamiento no tienen variación para el escenario propuesto ya que se considera todo el material en un mismo conjunto hasta que llega al proceso de flotación, por tanto, para el cálculo de este ítem se consideraron sobrecostos en los rubros de flotación, espesado, laboratorio metalúrgico y filtrado principalmente. Por otra parte, los costos de procesamiento se calculan de acuerdo con la Ecuación 5.5 donde se han contemplado todos los gastos de operación OPEX:

$$Costo\ procesamiento = OPEX\left[\frac{USD}{t}\right] \cdot ton\ proces \tag{5.5}$$

Finalmente, se tienen en cuenta los costos de tratamiento (Ecuación 5.6) que equivalen al pago por obtener únicamente concentrado sin refinar como producto:

$$Costo\ tratamiento = TC\left[\frac{USD}{ton}\right] \cdot ton\ concen + RC\left[\frac{cUSD}{lb}\right] \cdot 2204{,}6\left[\frac{lb}{ton}\right] \cdot ton\ concen \tag{5.6}$$

5.2.1 Indicadores económicos (VAN, TIR, análisis de sensibilidad)

- VAN y TIR

Para saber qué tan rentable es implementar un proyecto, se utiliza la Ecuación 5.7 correspondiente al Valor Actual Neto (VAN) que es el valor presente de los flujos de caja (FC) en un periodo determinado, en este caso 4 años (Tabla 5-2). Para actualizar el FC anual se usó una tasa de descuento o expectativa "i" menor al 20% (en este caso alrededor de 12% usualmente utilizada por las empresas mineras en Colombia), medida de rentabilidad mínima exigida por el proyecto que permite recuperar la inversión, cubrir los costos y obtener beneficios donde "I" corresponde a la inversión inicial [3] en el periodo 0, en este caso una inversión a 3 años; "t" a la vida útil del proyecto y "n" al periodo actual en el que se está evaluando (Mete, 2014).

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^{t} \frac{FC}{(1+i)^n}, \quad = \quad 3{,}22 \text{ MUSD} \qquad (5.7)$$

Tabla 5-2: Parámetros usados para cálculo de flujos de caja (FC) y valor actual neto (VAN) en un período de 5 años. Fuente: El autor.

Año	2020	2022	2023	2024	2025
Ingresos Cu		MUS$33,15	MUS$34,81	MUS$36,55	MUS$38,38
Ingresos Co		MUS$5,25	MUS$5,51	MUS$5,78	MUS$6,07
Gastos Cu		-MUS$8,90	-MUS$8,98	-MUS$9,07	-MUS$9,17
Gastos Co					
Costos Cu		-MUS$20,63	-MUS$24,63	-MUS$28,67	-MUS$32,74
Costos Co		-MUS$1,44	-MUS$1,45	-MUS$1,46	-MUS$1,48
Interés		-US$96.792	-US$37.662		
Depreciación (equipos, activos fijos)		-US$356.400	-US$356.400		
Ganancias gravables		MUS$6,97	MUS$4,85	MUS$3,12	MUS$1,05
Impuestos		-MUS$4,95	-MUS$3,44	-MUS$2,21	-MUS$0,75
Ganancias no gravables					
Ganancias netas		MUS$2,02	MUS$1,40	MUS$0,90	MUS$0,30
Depreciación		US$356.400	US$356.400		
Amortización		-US$220.435	-US$279.565		
Inversión (aditivos, celdas, test ingeniería, factibilidad)	-MUS$5,00				
Financiación	MUS$0,50				
Flujo de caja	-MUS$4,50	MUS$4,18	MUS$2,89	MUS$1,81	MUS$0,61

El VAN se asoció al Payback Period (PP) con el fin de conocer desde qué momento la planificación podría traer utilidad. Para ello, se evaluó el período en que el VAN es cero (Tabla 5-3) usando a su vez la Tasa Interna de Retorno (TIR) como se observa en la Ecuación 5.8, que corresponde a la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos del proyecto, esto representa el interés cuando el VAN es cero (Mete, 2014).

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^{t} \frac{FC}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (5.8)$$

Tabla 5-3: Evaluación de la tasa interna de retorno (TIR) en función del valor anual neto (VAN). Fuente: El autor.

WACC_tasa de descuento “i”	12%
VAN (MUSD)	3,22
TIR siendo el VAN=0	55%

[3] Nota: Otras inversiones como exploraciones no son tenidas en cuenta.

- Análisis de sensibilidad

Se generaron posibles escenarios respecto a la variación porcentual de parámetros que afectan a la evaluación económica. Para cada uno de esos escenarios se analizó el impacto para el VAN acumulado en función del precio y los costos (precisamente los operativos de mayor variabilidad en el tiempo), por tanto, se tomó como referencia una variación porcentual de -20%, -10%, +10% y +20% como se observa en la Tabla 5-4:

Tabla 5-4: Análisis de sensibilidad VAN acumulado en función del precio y costos tanto de cobre como cobalto. Fuente: El autor.

Análisis de sensibilidad					
	Escenario	**VAN acumulado**		**Escenario**	**VAN acumulado**
PRECIO (MUSD)	+20%	17,70	COSTOS (MUSD)	+20%	0,156
	+10%	10,46		+10%	2,16
	-10%	-8,19		-10%	5,17
	-20%	-13,21		-20%	8,20

De acuerdo con los valores arrojados por el análisis de sensibilidad se observa un mayor impacto en el VAN al momento de modificar el precio del metal, incluso por encima de la posible fluctuación en los costos OPEX. Así mismo, el VAN puede tener valores negativos una vez el precio del cobre y cobalto disminuyen del 2% en adelante, esto también se evidencia cuando los costos aumentan en más de 25%. Adicionalmente, la TIR puede llegar a estar por debajo de cero en el escenario de una disminución en los costos por encima del 20% con un VAN aproximado de 10 MUSD.

Si bien el flujo de caja en los últimos períodos tiende a ser menor, se proyecta que para esos años el precio del cobalto tenga un incremento sustancial como ya se mencionó anteriormente. En el mismo sentido, todos los valores del flujo de caja se mantienen positivos sobre el tiempo al igual que el VAN acumulado y TIR, por tanto, esto permite comprobar una rentabilidad favorable del proyecto sumado a que no se tomaron en cuenta algunos ingresos extra de otros subproductos como plata y oro en el concentrado polimetálico.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Con base en los resultados de la caracterización química (usando ICP-MS y FRX) obtenidos de los compósitos de muestra tanto en los relaves mineros como en los concentrados de cobre que evidenciaron rangos de cobalto entre 450-480 ppm y tomando en consideración investigaciones anteriores hechas por el servicio geológico británico y estadounidense se logra catalogar el yacimiento de la mina El Roble como una potencial mena de cobalto de baja ley.

Según la estimación de recursos hecha en este trabajo a partir de la información disponible de los sondajes diamantinos, el contenido de cobalto presente en los principales cuerpos de sulfuro masivo de la mina El Roble oscila entre 474 ppm para el cuerpo Zeus y 322 ppm para los cuerpos Maximus y Goliat.

Respecto a la caracterización mineralógica, tomando en cuenta que aún hay aspectos pendientes por dilucidar, las condiciones paragenéticas del cobalto en un depósito tipo VMS como El Roble son pirita + pirrotina + calcopirita + magnetita y que una vez hecho el proceso de separación magnética la presencia de cobalto solo aumentó levemente (lo que quiere decir que no está tan fuertemente ligado a minerales ferromagnéticos como pirrotina o magnetita) se puede interpretar que para el presente caso, puede existir una fuerte asociación de cobalto con otros minerales de hierro no magnéticos como “pirita de alta temperatura (Lydon 1984) o pirita cobaltífera” (lo anterior a confirmar ya sea mediante difracción de rayos X, SEM o metalografía una vez sea posible concentrar el material de cobalto por encima del 5%).

Adicionalmente, se determinó que la flotación usando reactivos como aerofloat 208 como colector primario, aerofloat 31 como colector secundario, sulfato de cobre como activador, y aerofroth 65 como espumante evidenciaron el mejor rendimiento metalúrgico respecto a concentración de cobalto se trata. Sin embargo, esto deja una puerta abierta para continuar

realizando ensayos con diferente tipo de reactivos como danafloat 068 que eventualmente podrían optimizar su concentración.

Los análisis por ICP-MS evidencian anomalías en elementos catalogados menores en este trabajo ya que generalmente no tienen el mismo impacto en el mercado bursátil que los metales mencionados anteriormente, tal es el caso del selenio y el telurio que se encuentran alrededor de 40 ppm y 3 ppm respectivamente. La caracterización química realizada en los relaves mineros arrojó a su vez algunas leyes de cobre por encima de 0,3% lo cual debe revisarse (operativamente hablando) ya que se consideran valores negativos en términos de ley de relave y recuperación metalúrgica de cobre en el actual circuito de beneficio del proyecto.

Si bien el estudio económico de este trabajo se planteó inicialmente para evaluar la factibilidad de extracción de cobalto desde los relaves mineros, los resultados metalúrgicos no permitieron esto; por ende, se realizó ese ejercicio para el actual concentrado polimetálico. Así, de acuerdo con el análisis de sensibilidad y asumiendo un concentrado de cobalto mínimo del 5%, un margen de utilidad importante podría mantenerse aún bajo algunos escenarios poco favorables dependiendo mayormente de la fluctuación del precio de los *commodities*; por tanto, la comercialización de cobalto en el corto-mediano plazo se consideraría más rentable si se incluye como un subproducto dentro del concentrado principal de cobre siendo refinado de manera independiente tal como se hacía por ejemplo, en el distrito minero *Windy Craggy* en su momento con leyes de cobalto de entrada (cabeza de molino) muy similares a las del proyecto El Roble.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar con la realización de pruebas metalúrgicas en los relaves mineros en aras de optimizar la concentración del cobalto bajo otros parámetros, como ensayos de separación magnética en tambores de alta densidad y vía húmeda (tipo Jones) ya que si esto arroja resultados favorables metalúrgicamente hablando sería mucho más rentable aplicarlo a una escala industrial debido a que así podría evitarse un proceso de secado inmediato.

Realizar ensayos de flotación con otros colectores primarios como danafloat 067, 068 y 069 los cuales están más íntimamente enfocados a concentración de minerales de cobalto, adicionalmente, mezclado con xantato isopropílico de sodio con el fin de aumentar su eficiencia metalúrgica.

En vista de que el cobalto se mantiene como un metal estratégico y económicamente potencializado sobre el tiempo debido a sus múltiples usos tecnológicos (CRU Consulting_UPME, 2018) vale la pena continuar probando diferentes métodos para su concentración o extracción, ya sea en este depósito o en otros también potencialmente explotables con el objetivo de promover y fortalecer la economía circular en el país a través del aprovechamiento de los llamados “residuos mineros”.

Bibliografía

Adastra Minerals. (2004). Kolwezi Tailings Project - A Case Study. *UNESCO Conference, Paris (France), September 2004*, 1–18.

Agencia Nacional de Minería-Colombia. (2017). Rankings Mundiales 2017_Cobre. In *Website*. http://mineriaencolombia.anm.gov.co/images/Presentaciones/FICHA-MINERAL---COBRE-2018_.pdf

Andersson, B. A. (2000). Materials Availability for for Large-scale Thin-film Photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *8* (October 1999), 61–76.

Batterham, R. J., Grant, R. M., & Moodie, J. P. (1992). A perspective on Process mineralogy and Mineral processing. *The First International Conference on Modern Process Mineralogy and Mineral Processing_Beijing (China)*, 3–12.

CRU Consulting_UPME. (2018). Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035_Cobalto. In *Unidad de planeación minero energética: Vol. contrato n* (Issue 0).

Danafloat™ (2011). *Ficha técnica_Minerales de cobre-cobalto*. Disponible en: http://www.danafloat.com/es/mining_ores/copper_cobalt.

Darton Commodities Limited. (2016). *Cobalt market review.* Website_Market Research. https://www.dartoncommodities.co.uk/market-research/

Demetrius, P., & Smith, G. (2012). *Atico Mining Corporation technical report on the El Roble Project , Prepared by: AIPG Certified Geologist*.

Distribuidora de Químicos Industriales S.A. (2010). *Ficha técnica Promotor Aerofloat 208 acuoso*. Medellín – Colombia. Disponible en: https://www.academia.edu/38034010/FICHA_TÉCNICA_PROMOTOR_AEROFLOAT_208_Acuosohttps://www.academia.edu/38034010/FICHA_TÉCNICA_PROMOTOR_AEROFLOAT_208_Acuoso

Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting, 4th Edition McGraw Hill Book Co., New York.*

Ellingham, H. J. T. (1944). *Reducibility of oxides and sulphides in metallurgical processes*. Journal of the Society of Chemical Industry 63, pp.125-133.

Fisher, K. G. (2011). Cobalt Processing Developments. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th Southern African Base Metals Conference*, *0*(0), 237–258.

Franklin, J. M., Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., Richards, J. P., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., & Galley, A. G. (2019). Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume 0* , 523–560. https://doi.org/10.5382/av100.17

Glacier Rig LTD_Investment Mine. (2020). *5 Year Cobalt Prices and Price Charts*. Commodity Prices. http://www.infomine.com/investment/metal-prices/cobalt/5-year/

Global Energy Metals Corp. (2020). *Cobalt Demand*. Web Site_Cobalt_Cobalt Demand. https://www.globalenergymetals.com/cobalt/cobalt-demand/

Güntner, J., & Hammerschmidt, J. (2012). Sulphating roasting of copper-cobalt concentrates. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *112*(6), 455–460.

Hannis, S., & Bide, T. (2009). Mineral Profile. Cobalt. *British Geological Survey*, *0*(August), 18. http://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/mineralProfiles.html

Hawley, G. (1983). *The condensed chemical dictionary. 10th ed. / rev. by Gessner G. Hawley. New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1981. Print.*

Hitzman, M. W., Bookstrom, A. A., Slack, J. F., & Zientek, M. L. (2017). Cobalt—Styles of Deposits and the Search for Primary Deposits. *USGS Open-File Report*, *0*(0), 53. https://doi.org/10.3133/ofr20171155

International Seabed Authority ISA. (2008). Cobalt-Rich Crusts. *Brochure*, *0*, 1–4.

Joint Research Centre (JRC). (2018). *Cobalt : demand-supply balances in the transition to electric mobility*. the European Commission's science and knowledge service. https://doi.org/10.2760/97710

Kesler, S. (1994). Mineral resources, economics, and the environment. In *Macmillan Coll Div; Edition: Facsimile* (p. 391p).

Lane, K. F. (1988). *The Economic Definition of Ore, Cutoff Grade in Theory and Practice. Mining Journal Books, London.*

Lechner, M. J., & Earnest, D. F. (2016). *Amended Updated Mineral Resource Estimate, El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia*.

Lydon, J. W. (1984). Ore Deposit Models - 8. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits.

Part I: a Descriptive Model. In *Geoscience Canada* (Vol. 11, Issue 4, pp. 195–202).

Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et Ratio-Revista de Difusión Cultural y Científica de La Universidad La Salle En Bolivia*, *7*, *no*, P.67-85.

Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information System*, *4*(3), 313–332.

Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution, III. In *Regression, heredity and panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character* (pp. 187, 253–318).

Perez, A. (2012). *Optimización del proceso de flotación de calcopirita con metabisulfito de sodio y carbón activado a nivel laboratorio en la empresa administradora Chungar S.A.C.* Universidad Nacional del Centro Del Perú_Huancayo_ Facultad de Ingeniría Química.

Peter, J. M. (1988). The Windy Craggy Copper-Cobalt-Gold Massive Sulphide Deposit, Northwestern British Columbia (114p). *British Columbia Ministryo f Energy,M Ines and Petroleum Resources, Geological Flieldwork-University of Toronto*, *Paper 1989*(0), 114.

Pryor, B., & Lunt, D. (2003). Development of the Kolwezi tailings copper / cobalt flowsheet. *ALTA Nickel/Cobalt Conference. Perth (Australia), May 2003*, 1–9.

Reactivos nacionales S.A. – RENASA. (2006). *Especificaciones técnicas xantato isopropilico de sodio (z-11)*. ARMAR LTDA. Departamento Técnico, La Paz, Bolivia.

Romero, C., & Jasmany, R. (2018). *Concentración de oro de la mina "San Alfonso" mediante flotación con variación de granulometría y colectores.* Universidad de Azuay, Facultad de ciencia y tecnologia. Escuela de ingenieria en minas.

The Financial Times Limited. (2018). Pilot scheme seeks to produce first "ethical cobalt" from Congo. *A David Pilling Article*, 1. https://www.ft.com/content/dcea899a-2f8c-11e8-b5bf-23cb17fd1498.

Thermo Fisher Scientific. (2020). *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)*. Website. Industrial and Applied Science_Mass Spectrometry_Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). https://www.thermofisher .com/co/en/home/industrial/mass-spectrometry/inductively-coupled-plasma-mass-

spectrometry-icp-ms.html.html

UPME. (2016). *Cobre, ficha mineral_balance 2012-2016*. http://www1.upme.gov .co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_cobre.pdf.