

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor(es) Patrocinante(s)**  
Fernando Parada Luna

# **EVALUACION TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA FACTIBILIDAD DE PRODUCIR SALES DE COBRE EN UNA PLANTA DE LA PEQUEÑA MINERÍA**

**MANUEL MUÑOZ GONZALEZ**

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Marzo 2024

## RESUMEN

Durante las últimas décadas la minería a dados pasos agigantados en la innovación de extracción y producción de metales como hierro, aluminio, cobre, plata y oro, entre otros. En nuestro caso particular, el cobre ha permitido a Chile posicionarse como uno de los países con mayor potencial en el mercado mundial, lo que favorece enormemente el crecimiento económico de nuestro país.

Dentro del territorio nacional la practica minera ha generado muchísimo capital de trabajo y empleabilidad reflejada en un abrupto crecimiento económico y cultural en localidades con condiciones climáticas inhóspitas.

La pequeña minería y minería artesanal, contrario a las medianas y grandes empresas, y debido a sus métodos de explotación, siempre se encuentran expuestas frente a variaciones en el mercado, lo que se refleja en los precios ofrecidos por su demanda o en la sobre oferta de productos. Frente a este escenario algunas pequeñas mineras se ven en la obligación de responder mediante el cierre de sus operaciones y la reducción de inversiones.

En esta memoria se desarrolló un estudio técnico y de mercado que avalan los beneficios económicos de obtener sales de cobre a partir de óxidos de cobre, tomando en cuenta todos los aspectos a considerar en el proceso productivo.

La planta de beneficio descrita consta de 4 etapas fundamentales las cuales trabajan con una dotación de mineral aproximada de 200 toneladas diarias y una ley en mineral de 1.7%. La sal producida en el estudio fue el sulfato de cobre pentahidratado la que posee un amplio mercado y una alta demanda, especialmente en el sector agrícola.

La producción diaria de sulfato de cobre pentahidratado se estima en 12.78 tpd que refleja un beneficio económico de USD 22.109 por día.

La evaluación económica asociada al estudio arrojó una inversión inicial de USD 5.581.560, un capital de trabajo de USD 1.504.869 y costos de operación USD 6.082.414 anual. El VAN presentado en el estudio, al cabo de 10 años, es de USD 3.021.542 y una TIR de 16%.

## ABSTRACT

During the last decades, mining has made great strides in innovation in the extraction and production of metals such as iron, aluminum, copper, silver and gold, among others. In our case, copper has allowed Chile to position itself as one of the countries with the greatest potential in the world market, which greatly favors the economic growth of our country.

Within the national territory, the mining practice has generated a lot of working capital and employability reflected in an abrupt economic and cultural growth in locations with inhospitable climatic conditions.

Small-scale and artisanal mining, as opposed to medium and large companies, and due to their exploitation methods, are always exposed to market variations, which is reflected in the prices offered by their demand or in the oversupply of products. Faced with this scenario, some small mining companies are forced to respond by closing their operations and reducing investments.

In this report a technical and market study was developed to support the economic benefits of obtaining copper salts from copper oxides, considering all aspects to be considered in the production process.

The described beneficiation plant consists of four fundamental stages, which work with an approximate daily ore allocation of 200 tons and an ore grade of 1.7%. The salt produced in the study was copper sulfate pentahydrate, which has a large market and high demand, especially in the agricultural sector.

Daily production of copper sulfate pentahydrate is estimated at 12.78 tpd which reflects an economic benefit of USD 22109 per day.

The economic evaluation associated with the study yielded an initial investment of USD 5581560, working capital of USD 1504869 and annual operating costs of USD 6082414. The NPV presented in the study, after 10 years, is USD 3021542 and an IRR of 16%.

## INDICE

1.	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.2.1.	Objetivo General .....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	2
2.	CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES .....	3
2.1.	Pequeña Minería .....	3
2.1.1.	Características de la Pequeña Minería.....	4
2.1.2.	Producción .....	5
2.2.	Sulfato de Cobre .....	9
2.2.1.	Usos del Sulfato de Cobre.....	10
2.2.2.	Mercado del Sulfato de Cobre .....	12
2.3.	Cristalización .....	14
2.3.1.	Factores que Influyen en la Cristalización .....	14
2.3.2.	Cristalización en el Sistema Sulfato de Cobre–Ácido Sulfúrico–Agua.....	15
2.3.3.	Formas Comerciales más Importantes de Sulfato de Cobre .....	15
2.3.4.	Geometría del Crecimiento del Cristal.....	17
2.3.5.	Pureza del Producto.....	18
2.3.6.	Velocidad de Crecimiento del Cristal.....	18
3.	CAPÍTULO 3: ESTUDIO TÉCNICO .....	20
3.1.	Descripción del Proceso de Obtención de Sulfato de Cobre .....	20
3.1.1.	Etapa de Chancado.....	20
3.1.2.	Etapa de Aglomerado y Curado .....	21
3.1.3.	Etapa de Lixiviación .....	21
3.1.4.	Etapa de Extracción por Solvente (SX) .....	22
3.1.5.	Etapa de Reextracción y Cristalización .....	25
3.2.	Criterios de Diseño.....	26
3.2.1.	Lixiviación.....	26
3.2.2.	Extracción por Solvente .....	27
3.2.3.	Arrastre de Fases y Evaporación .....	27
3.2.4.	Cristalización.....	28
3.3.	Balance de Masa.....	28
3.3.1.	Agglomeración y Lixiviación .....	28
3.3.2.	Extracción por Solvente .....	29
3.3.3.	Cristalización.....	30
3.4.	Parámetro de Dimensionamiento de Equipos .....	30

3.4.1.	Área de Chancado .....	30
3.4.2.	Área de Lixiviación y Aglomerado .....	32
3.4.3.	Área de SX. Cristalización y Embalaje .....	35
4.	CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	39
4.1.	Parámetros.....	39
4.2.	Inversión de la Planta.....	41
4.2.1.	Capital Directo.....	41
4.2.2.	Capital Indirecto .....	43
4.3.	Costos Operacionales .....	43
4.3.1.	Insumos.....	43
4.3.2.	Compra del Mineral .....	46
4.3.3.	Mano de Obra Directa .....	46
4.3.4.	Mantenimiento.....	47
4.4.	Depreciación .....	47
4.5.	Ingresos .....	47
4.6.	Flujo de Caja .....	48
4.7.	Análisis de Sensibilidad.....	50
5.	CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	52
5.1.	Conclusiones.....	52
5.2.	Recomendaciones.....	53
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	54
7.	ANEXOS.....	56

## INDICE TABLAS

Tabla 1.	Promedio mensual de mineral comprado por la ENAMI por cada productor asociado.....	7
Tabla 2.	Propiedades fisicoquímicas del sulfato de cobre. (Química Industrial Chile, 2020) .....	9
Tabla 3.	Características generales del extractante LIX 984N .....	22
Tabla 4.	Resultado de las isotermas para LIX 984N al 21 % v/v y PH = 2 para [Cu <sup>2+</sup> ] = 6 g/l (Gahona Gallardo, 2011) .....	23
Tabla 5.	Criterios para el diseño de la planta de lixiviación.....	26
Tabla 6.	Criterios para el diseño de la planta de extracción por solvente .....	27
Tabla 7.	Criterios para el diseño de arrastre de fases, retenciones y pérdidas por evaporación.....	27
Tabla 8.	Criterios para el diseño de la planta de cristalización .....	28
Tabla 9.	Resultados del balance en las etapas de aglomeración y lixiviación .....	28
Tabla 10.	Resultados del balance en la etapa de extracción por solvente.....	29
Tabla 11.	Resultados del balance en la etapa de cristalización.....	30
Tabla 12.	Características del chancador primario.....	31
Tabla 13.	Características del chancador secundario .....	31
Tabla 14.	Características del harnero vibratorio .....	31
Tabla 15.	Características de la cinta transportadora.....	32
Tabla 16.	Características del tambor aglomerador .....	33
Tabla 17.	Características de las cintas transportadoras .....	33
Tabla 18.	Características de diseño para cada pila de lixiviación .....	34
Tabla 19.	Característica de equipos mezcladores .....	35
Tabla 20.	Característica de equipos mezcladores .....	35
Tabla 21.	Característica de coalescedor de orgánico cargado. ....	36
Tabla 22.	Característica de post decantador de refino. ....	36
Tabla 23.	Característica de equipos mezclador cristalizador. ....	37
Tabla 24.	Característica de decantador cristalizador .....	37
Tabla 25.	Características del lavador de cristales.....	38
Tabla 26.	Características de secador rotatorio. ....	38
Tabla 27.	Características de balanza de pesaje de maxi sacos. ....	38
Tabla 28.	Factores de estimación del costo físico total de la planta .....	40
Tabla 29.	Factores de estimación de costos de ingeniería y contingencias.....	40

Tabla 30.	Inversión en equipos del área de chancado.....	41
Tabla 31.	Inversión en equipos del área de aglomerado y lixiviación .....	41
Tabla 32.	Inversión en equipos del área de extracción por solvente .....	41
Tabla 33.	Inversión en equipos del área de cristalización y embalaje.....	42
Tabla 34.	Inversión en equipos del área administrativa y operativa.....	42
Tabla 35.	Estimación de costos indirectos asociados a la inversión .....	43
Tabla 36.	Consumo mensual de reactivos orgánicos .....	44
Tabla 37.	Consumo mensual de ácido sulfúrico en planta.....	44
Tabla 38.	Consumo mensual de agua en la planta.....	45
Tabla 39.	Consumo de energía eléctrica por área de la planta.....	45
Tabla 40.	Costos del consumo de energía eléctrica por etapa de proceso.....	45
Tabla 41.	Costos de mano de obra para el área administrativa.....	46
Tabla 42.	Costos de mano de obra para el área de operación .....	46
Tabla 43.	Valor FOB de sulfato de cobre pentahidratado en la última década .....	47
Tabla 44.	Flujo de caja calculado para 10 años con valores entregados en USD .....	49
Tabla 45.	Cambios en indicadores financieros en función del precio FOB de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 50	
Tabla 46.	Cambios en indicadores financieros en función de ley de cobre en mineral .....	50
Tabla 47.	Cambios en indicadores financieros en función del precio de compra del mineral 51	
Tabla 48.	Bomba peristáltica para soluciones ácidas .....	56
Tabla 49.	Bomba centrífuga de agua fresca .....	56
Tabla 50.	Bomba centrífuga de Pulpa.....	57
Tabla 51.	Bomba de arrastre magnético.....	57
Tabla 52.	Bomba de arrastre magnético.....	57

## INDICE FIGURAS

Figura 1.	Promedio de productores de la pequeña minería asociados a la ENAMI (Del Campo Arias, 2021).....	5
Figura 2.	Minerales de cobre comprados por la ENAMI dirigidos a flotación y lixiviación. (Del Campo Arias, 2021) .....	6
Figura 3.	Valores de compra de minerales y productores mineros. (Del Campo Arias, 2021) .....	7
Figura 4.	Relación de precios de compra de la ENAMI en la última década. (Del Campo Arias, 2021) .....	8
Figura 5.	Principales usos del sulfato de cobre pentahidratado. Fuente: (Tabilo, 2012, p. 24) .....	10
Figura 6.	Producción regional de sulfato de $H_2SO_4 \cdot 5H_2O$ entre los años 2011 al 2020.13	
Figura 7.	Principales empresas mineras que exportan sulfato de cobre .....	14
Figura 8.	Diagrama de flujo del proceso implementado .....	20
Figura 9.	Isoterma de extracción para LIX 984N al 21 % v/v y PH = 2 para $[Cu^{2+}] = 6 \text{ g/l}$ 24	
Figura 10.	Diagrama de flujo esquemático para la producción de sulfato de cobre pentahidratado 25	
Figura 11.	Ficha técnica del sulfato de cobre pentahidratado .....	58

## NOMENCLATURA

PLS: Pregnant leach solution

Tpd: Toneladas por día

L/min: Litros por minuto

gpL: Gramos por litro

kg H<sup>+</sup>/TMS: Kilogramos de ácido por cada tonelada de mineral seco

TM/m<sup>3</sup>: Toneladas de mineral por cada metro cúbico

l/m<sup>2</sup>/h: Litros por metros cuadrados por cada hora

ppm: partes por millón

m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>: metros cúbicos por hora por cada metro cuadrado

VAN: Valor actual neto

TIR: Tasa interna de retorno

TMS: Toneladas de mineral seco

SX: Etapa de extracción por solventes

CR: Etapa de cristalización

E1: Primera etapa de extracción por solventes

E2: Segunda etapa de extracción por solventes

OC: Orgánico cargado

OD: Orgánico descargado

ES: Electrolito saturado

# 1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La pequeña minería fue creada como un renovado enfoque empresarial, según los expertos, en la década de los 90, donde la economía latinoamericana se caracterizó por diversas aperturas de mercados de inversión privada e internacional. La pequeña minería no quedó exenta de esto.

En la segunda mitad del siglo XX, varios países latinoamericanos intentaron, sin éxito, estratificar la industria minera basándose en factores como el tamaño de producción, capital invertido y el número de trabajadores involucrados en la extracción de minerales. Esta estratificación, que categorizó la minería en pequeña, mediana y gran escala, llevó a los gobiernos a implementar una serie de planes y programas en diferentes áreas, sin una planificación integrada efectiva. Algunos de estos esfuerzos se centraron en promover la minería a pequeña escala o artesanal, otros en estimular la inversión estatal en grandes proyectos, y otros en crear un ambiente propicio para atraer inversión extranjera a la gran minería. (Chaparro, 2000, p. 7)

En el transcurso del tiempo la pequeña minería ha tenido un impacto importante en la sociedad y en las reservas naturales debido al polémico uso de estas. A pesar ello ha existido sociedades, incluso aún existen países, donde esta es el único sustento económico tanto para los pequeños mineros como para las familias y comunidades enteras.

Un desafío poco evaluado en este segmento minero es garantizar la continuidad del proceso de transformación de óxidos o sulfuros a sales de cobre que, durante la vida útil de la explotación, sean rentables para la generación de un mayor margen de utilidades y, de ser posible, puedan llevar a una expansión de estas pequeñas empresas mineras a la elaboración de proyectos de mayor envergadura. Bajo estas observaciones nace el presente proyecto, creado con base en la teoría de menos gastos y mayor inversión, lo cual no solo le abrirá las puertas a un mercado actual, sino también a un mercado futuro.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar técnica y económicamente la viabilidad y rentabilidad de establecer una planta de beneficios metalúrgicos para la obtención de sales de cobre en una empresa de la pequeña minería.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Realizar un estudio de mercado para analizar la demanda y la oferta de sales de cobre, considerando valores de mercado nacional e internacional.
2. Proponer un *flowsheet* para la implementación de la planta de beneficios metalúrgicos para la obtención de sales de cobre a partir del proceso de lixiviación en pilas para óxidos de cobre.
3. Realizar un estudio técnico para evaluar la viabilidad de la instalación de la planta de beneficio metalúrgico, considerando aspectos como consumos unitarios y el proceso de obtención de las sales de cobre.
4. Estimar la inversión del proyecto, los ingresos y los costos de operación, tomando como base la información provista por la empresa y realizando una sensibilización del proyecto, variando los precios del cobre, el ácido y la energía.
5. Evaluar la rentabilidad del proyecto calculando indicadores como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

## 2. CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

### 2.1. Pequeña Minería

La pequeña minería descrita por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) “son aquellas faenas que poseen una dotación inferior a 80 trabajadores y tienen menos de 200 000 mil horas trabajadas durante un periodo de un año” (Comisión Chilena del Cobre [Cochilco], 2014, p. 1). Asimismo, en función de la fuerza laboral implicada, en el Código de Minería la pequeña minería es definida como el conjunto de actividades que implican un número inferior a 12 trabajadores, y en la Ley 18248 de 1983 de Impuestos a la Renta se clasifica como tal por la vinculación de un número de trabajadores menor que 5. Mientras que la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) la define como un sector con una producción de venta individual de hasta 10 000 toneladas mensuales de mineral o su equivalente en productos mineros. Esas variaciones en su definición y clasificación se deben al hecho de que la pequeña minería a nivel mundial no tiene parámetros universales y uniformes, por lo que aún no se ha establecido una norma que la defina de forma única.

Existen dos tipos de subdivisión de la pequeña minería, a saber: la pequeña minería propiamente dicha y la pequeña minería artesanal o pirquineros. Esta última forma es definida solo por efectos tributarios como una faena con un máximo de 5 personas dependientes.

Debido a lo anterior, en la pequeña minería, tanto a nivel mundial como nacional, se han utilizado diversos parámetros para clasificar la actividad, entre ellos: el nivel de producción, la cantidad de propiedad minera, el capital invertido o el número de trabajadores vinculados a la realización de la actividad.

Es importante destacar que la pequeña minería cumple un rol geopolítico y social que es clave para el país, por cuanto se desarrolla en zonas donde es la única actividad económica que lleva a cabo la población. Es precisamente la producción de las empresas mineras de estos segmentos la que otorga posibilidades laborales a pequeños mineros a lo largo del país y en todo el mundo. A ello se suma la existencia de sectores aislados en algunos pueblos donde esta actividad es la única fuente de ingresos existentes.

En el caso de Chile, según las estimaciones de Sernageomin y Cochilco, la pequeña minería genera en torno a los 50 000 empleos directos e indirectos (subcontratos), mientras que la mediana minería genera alrededor de 80 000 trabajadores directos e indirectos (subcontratos). Según la misma fuente del cuadro 7 (operaciones mineras), Chile tendría en torno a 2000 minas, generando 35 000 empleos directos en la pequeña y mediana minería.

La pequeña y mediana minería en Chile cumple un importante papel al estar presente en la producción de cobre, oro, plata, hierro, manganeso, plomo, zinc, entre otros. Produce alrededor del 6 % del cobre, el 20 % del oro, el 10 % de la plata, el 32 % del hierro y el 100 % del manganeso (SONAMI, 2014).

A nivel general, incluyendo a la gran minería, el cobre constituye en torno al 10 % del PIB, cerca del 50 % de las exportaciones y alrededor del 15 % de los ingresos fiscales de la última década. El empleo minero representa alrededor del 3 % del empleo total, estas cifras tienen un mayor impacto en las regiones del norte, como lo es Antofagasta en donde el empleo asociado a actividades mineras oscila en torno al 20 % del empleo total de esa región. (Meller y Meller, 2021, p. 24)

La pequeña minería no tiene acceso, como la mediana y gran minería al sistema financiero, ni a cotizar en el mercado de capitales porque no posee reservas certificables o bancables, trabaja sin un plan minero concebido y muchas veces no cuenta con reservas económicamente explotables o en categoría probada o probable, solo trabajan con muy poco mineral a la vista o recursos inferidos.

### **2.1.1. Características de la Pequeña Minería**

El pequeño minero es aquel que trabaja en instalaciones propias o ajenas con una capacidad de extracción de hasta 10 000 TM mensuales de mineral para su venta directa en bruto o su procesamiento en pequeñas plantas de beneficio. Este segmento está formado por una gran cantidad de mineros que se acogen a la política de fomento del Estado y en su mayoría venden su producción a los poderes compradores de ENAMI a través de un sistema de tarifas. Dentro de la pequeña minería se distinguen dos grupos diferenciados de acuerdo con su capacidad de gestión, hay un sector de pequeña minería en cierta medida más formal y un sector de pequeña minería artesanal (PMA).

El grupo más formal incluye faenas en mina regularmente más organizadas y con un cierto grado de mecanización, donde está vinculado fundamentalmente a pequeñas plantas en las que se benefician minerales en baja escala. Adicionalmente se observa un mayor porcentaje de propietarios de las faenas en relación con el grupo artesanal.

Los mineros artesanales, que se conocen como pirquineros, operan fundamentalmente en minas en las que solo se extrae mineral y en pequeños trapiches artesanales en los que se concentra muy rudimentariamente el metal. Es un grupo particularmente pobre y concentrado en el quintil más bajo de ingresos de la población chilena, se trata de trabajadores independientes muy poco organizados. En muchos casos no son propietarios de las faenas que explotan, en

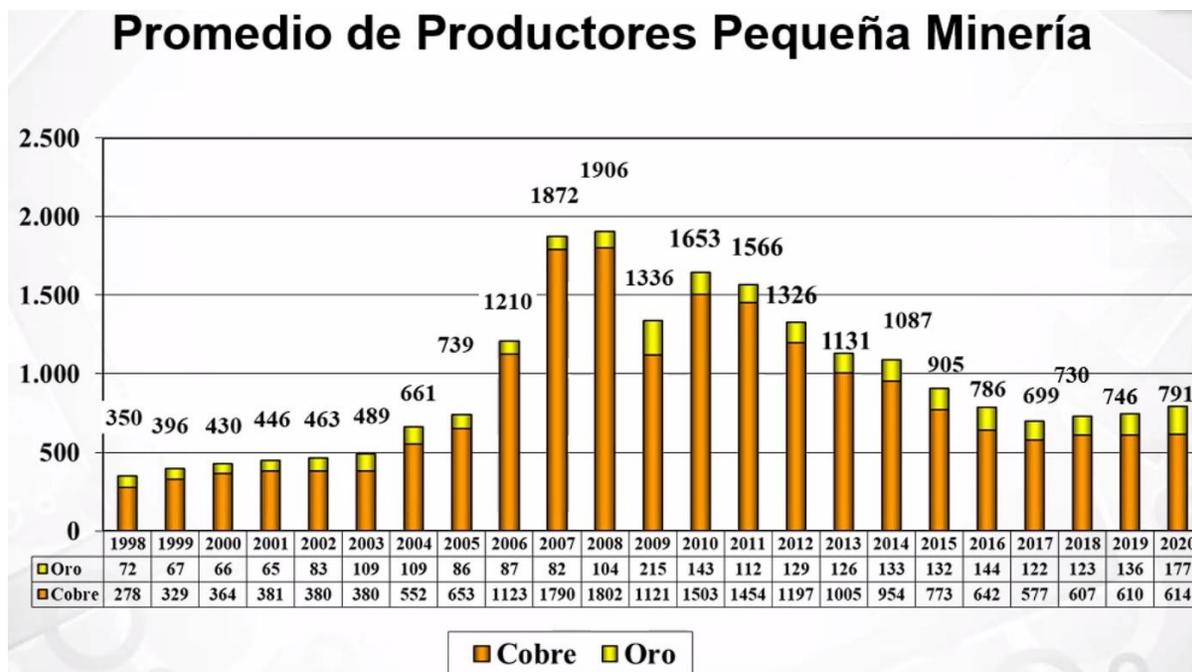
general no utilizan equipos, operan a base de la fuerza humana en la extracción y en agrupaciones de tipo familiar. Existe una muy alta estacionalidad que determina una movilidad que hace aún más complicada su identificación y fiscalización.

Considerando el empleo directo de la pequeña minería incluyendo cobre, oro y plata se observa una evolución creciente en el siglo XXI en donde al principio el empleo directo total era inferior a 10 000 personas; en el período 2015-2019 este empleo fluctúa en torno de las 15 000 personas.

La pequeña minería cuprífera representa más del 90 % del total; el empleo de la minería oro y plata alcanza a 700 personas aproximadamente. (Meller y Meller, 2021, pp. 24-25)

### 2.1.2. Producción

En la figura que se muestra a continuación se puede observar el promedio de productores de la pequeña minería relacionados con la ENAMI en los últimos 20 años, el cual corresponde aproximadamente al 70 % del total de pequeños productores nacionales de cobre y oro que se relacionan con la ENAMI.



**Figura 1. Promedio de productores de la pequeña minería asociados a la ENAMI (Del Campo Arias, 2021)**

ENAMI compra a los productores de la pequeña minería tanto óxidos como sulfuros de cobre para enviarlos respectivamente a sus plantas de flotación y lixiviación. En la siguiente figura

se muestran detalladamente las compras realizadas por la empresa ENAMI desde el año 1998 hasta el año 2020.



**Figura 2. Minerales de cobre comprados por la ENAMI dirigidos a flotación y lixiviación. (Del Campo Arias, 2021)**

En cuanto al valor de las compras de minerales y productos mineros, de acuerdo con los reportes de la misma ENAMI, las cifras de compra a los pequeños productores mineros son las que se representan en figura 3. Con base en esta figura se construyó la siguiente tabla que muestra el promedio estimado de producción de cada asociado que le vende a la empresa ENAMI.

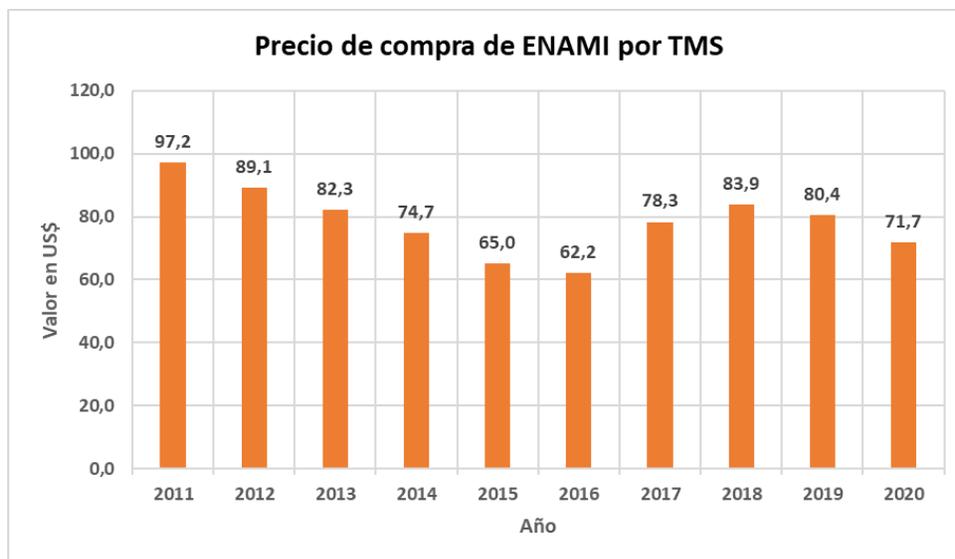
Tabla 1. Promedio mensual de mineral comprado por la ENAMI por cada productor asociado

Año	Promedio mensual de mineral (TMS)
2011	248.2
2012	255.5
2013	276.1
2014	279.5
2015	262.0
2016	281.7
2017	293.2
2018	281.4
2019	278.7
2020	302.7



Figura 3. Valores de compra de minerales y productores mineros. (Del Campo Arias, 2021)

En la figura 4 se representa gráficamente el valor al cual la ENAMI ha comprado cada tonelada de mineral seco a las faenas de la pequeña minería a lo largo de la última década.



**Figura 4.** Relación de precios de compra de la ENAMI en la última década. (Del Campo Arias, 2021)

## 2.2. Sulfato de Cobre

El cobre, cuyo símbolo es Cu, es el elemento químico de número atómico 29 más conocido como el mineral rojo que junto a la plata y el oro forman la denominada “familia del cobre”, dado que poseen dos características que lo destacan. La primera es que estos son los mejores conductores naturales de electricidad, y la otra es que son los más utilizados en la historia de la acuñación de monedas. (Bocanegra, 2021, p. 11)

El cobre se transformó en uno de los primeros metales en ser trabajado por los seres humanos bajo la forma de cobre nativo o natural de alta pureza. Además, posee propiedades que lo convierten en un elemento imprescindible para nuestra vida cotidiana debido a que es un antibacteriano, no pierde sus propiedades mecánicas y es fácil de reciclar. (Codelco Chile, 2018, párr. 3-7)

Dentro de las propiedades y elaboraciones del cobre se encuentra el sulfato cúprico que puede ser referido con otras denominaciones como vitriolo azul y calcantita caparrosa azul. Se trata de un compuesto químico que proviene del cobre, el cual, en seco, es un polvo que tiene una tonalidad entre verdosa y grisácea, pero al ser hidratado adquiere una tonalidad de color azul brillante.

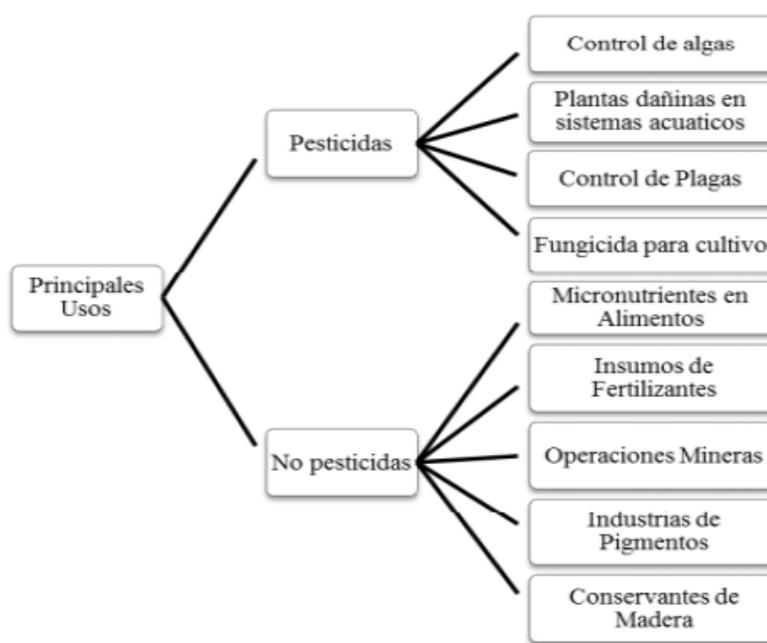
A continuación, en la siguiente tabla se muestran los valores de las principales propiedades fisicoquímicas del producto que recibe el nombre de sulfato de cobre de diferentes fuentes. Los datos del contenido de azufre y cobre se presentan a partir de los datos que se obtienen en la cromatografía en capa fina.

**Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del sulfato de cobre. (Química Industrial Chile, 2020)**

Propiedades	Medida	Unidad
Peso molecular	249.54	g/mol
Densidad relativa	2.3	g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad	31.7	g/100ml H <sub>2</sub> O @ 0°C
PH a 50 g/l	4	
Contenido de azufre	12.8	%
Contenido de cobre	25	%

### 2.2.1. Usos del Sulfato de Cobre

El sulfato de cobre posee propiedades que sirven como desinfectante, antiséptico y germicida en infecciones causadas por bacterias y hongos. También puede ser utilizado como micronutriente mineral y catalizador cúprico en la producción de productos farmacéuticos como agentes antimicrobianos (Zinsa, 2016). Debido a la composición química y a las propiedades que posee este compuesto químico tiene diversas aplicaciones, como se evidencia en la Figura 5, orientadas principalmente al área industrial, especialmente a la agricultura donde es utilizado para el control de plagas y enfermedades bacterianas que afectan a los cultivos de árboles frutales, campos, frutos secos y vegetales.



**Figura 5.** Principales usos del sulfato de cobre pentahidratado. Fuente: (Tabilo, 2012, p. 24)

En los siguientes apartados se describen de manera sucinta las principales fuentes de uso del sulfato de cobre.

#### 2.2.1.1. Minería

Es universalmente empleado en la segunda etapa de las flotaciones diferenciales de sulfuros de plomo y zinc. En la primera etapa se flota la galena, deprimiendo la blenda con el cianuro, con el sulfato de zinc o con ambos.

La blenda, una vez en las colas, es reactivada por el sulfato de cobre, volviendo a ser capaz de flotar. La presencia de cal o de carbonato de sodio no impide la operación, por lo que

frecuentemente se usan a la vez, para deprimir la piritita que pueda acompañar a la blenda. Por el contrario, el empleo de sulfato de cobre con los xantatos puede ser peligroso porque se forma un xantato insoluble de cobre, que no tiene acción activadora. (Morales, 2015, p. 18)

#### **2.2.1.2. Tinturas**

“El sulfato de cobre, igualmente llamado *vitriol bleu* (vitriolo azul), es utilizado para acentuar las tinturas vegetales aplicadas sobre la madera, también es utilizado para oxidar los materiales ferrosos y darles efectos de envejecimiento” (Morales, 2015, p. 19).

#### **2.2.1.3. Tratamientos de Agua**

“El sulfato de cobre se utiliza también como base de productos para piscinas, con el objetivo de reducir la producción de algas, así como los malos olores y sabores que estas causan” (Morales, 2015, p. 19).

#### **2.2.1.4. Agricultura y Ganadería**

El desarrollo agrícola actual exige productos de la más alta calidad, eficientes y de bajo costo. Su efectiva acción fungicida y su alta solubilidad lo hacen ideal para el combate de numerosas plagas como antracnosis, mancha de la hoja, pudrición del fruto, mancha de chapopote, roña o sama del fruto, chamusco, mazorca negra, moho de hilachas, mildiu cenicilla vellosa, cenicilla fumagina, melanosis y gomosis entre muchas otras.

Como elemento nutritivo, el sulfato de cobre es esencial, permitiéndole a sus cultivos tener un crecimiento sano y evitar las deficiencias que surgen por la falta de este importante mineral. (Morales, 2015, p. 29)

En cuanto a la actividad ganadera en esta el sulfato de cobre es utilizado como aditivo en la alimentación animal debido a que es un estimulante del crecimiento. También se utiliza para prevenir enfermedades como la fragilidad ósea y la anemia en los ganados.

#### **2.2.1.5. Alimentos Balanceados**

“El sulfato de cobre grado alimenticio, tipo nieve, es utilizado para formar premezclas minerales necesarias para conformar el alimento de aves, ganado, porcino, vacuno y ovino, entre otros” (Morales, 2015, pp. 19-20).

### **2.2.1.6. Galvanoplastia**

“Para llevar a cabo el cobrizado, que sirve como anticorrosivo de metales, se utiliza el sulfato de cobre con bajo contenido de hierro, característica fundamental para este proceso” (Morales, 2015, p. 20).

### **2.2.1.7. Industria Metálica**

La industria metálica “utiliza paralelamente grandes cantidades de sulfato de cobre como electrolito en las refinerías de cobre, proporcionando un eficiente recubrimiento para los alambres de acero antes del trefilado de cobre” (Morales, 2015, p. 20). En la zona sur del país existe una importante cantidad de mineral oxidado de cobre que es tratada por la gran minería mediante el proceso de electro obtención, mientras que en la pequeña y mediana minería es tratada en plantas de cemento de cobre.

## **2.2.2. Mercado del Sulfato de Cobre**

Los principales Estados importadores de sulfato de cobre a nivel mundial son:

### **2.2.2.1. Canadá y Estados Unidos**

Estos mercados requieren productos de alta calidad, es decir, sulfato de cobre pentahidratado en su grado alimenticio. Exigen el mínimo contenido de dioxinas y la existencia de pruebas que certifiquen su calidad, puesto que es utilizado en su mayoría para alimentar animales. (Morales, 2015, p. 12)

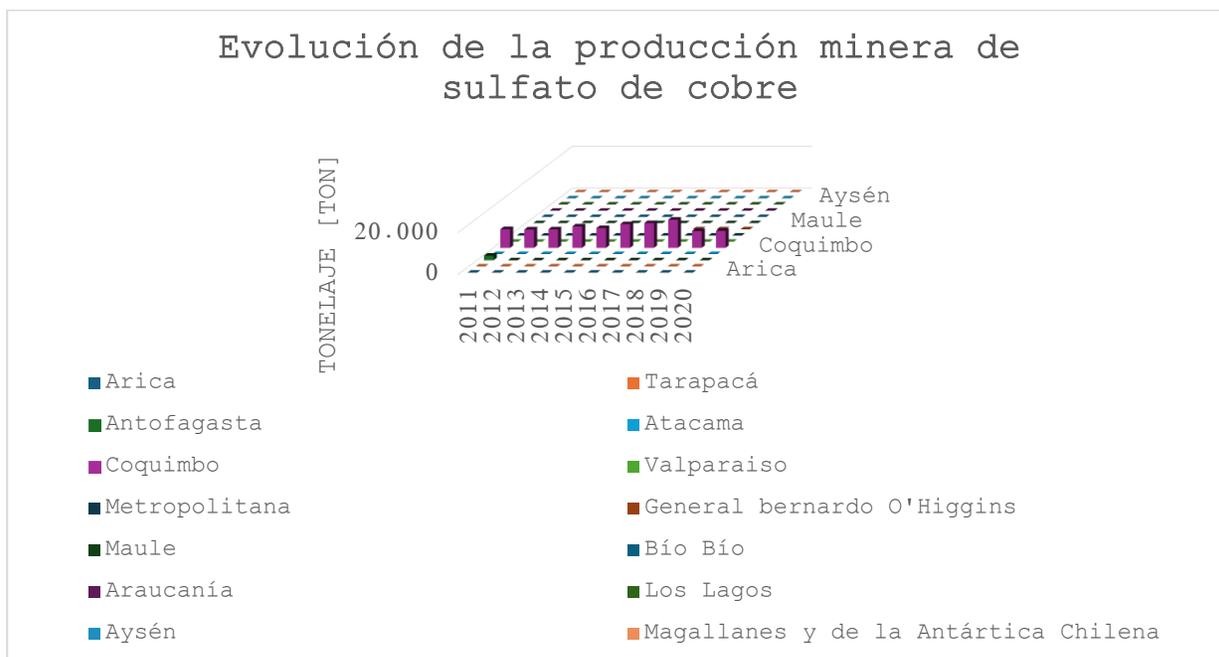
### **2.2.2.2. Unión Europea**

Los principales consumidores son países agroindustriales como Alemania, Francia, Holanda, Reino Unido y España. La demanda ha sido históricamente abastecida por la producción interna más las importaciones que básicamente provienen desde Rusia y China. La industria de alimentos que consume sulfato de cobre en su grado alimenticio mantiene una demanda estable incluso en periodos de crisis, debido a su incidencia sobre el consumo básico de alimentos de la población. (Morales, 2015, pp. 12-13)

### 2.2.2.3. América Latina

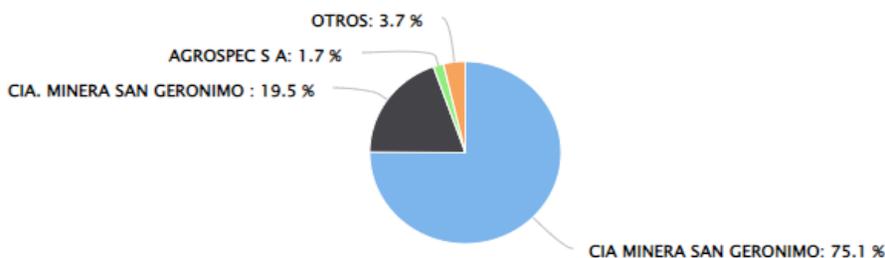
En el mercado latinoamericano, “el importante crecimiento agroindustrial en el sector ganadero, mayoritariamente donde se ha tecnificado la elaboración de alimentos concentrados, señala un serio interés por el sulfato de cobre en su grado alimenticio” (Morales, 2015, p. 13)..

### 2.2.2.4. Sulfato de Cobre en Chile



**Figura 6. Producción regional de sulfato de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  entre los años 2011 al 2020 (COCHILCO, 2022)**

Las exportaciones de cristales de sulfato de cobre en Chile son mayoritariamente cubiertas por empresas como CIA Minera San Gerónimo y AGROSPEC que realizan el 94.6 % y 1.7 % de este tipo de comercio, siendo los principales países de destino los Países Bajos, Canadá y el Reino Unido. (Veritrade, 2015)



**Figura 7. Principales empresas mineras que exportan sulfato de cobre (Veritrade, 2015)**

## **2.3. Cristalización**

Se entiende por cristalización un “proceso químico en el que se transforma un gas, un líquido o una disolución en un conjunto de cristales sólidos” (Ondarse, 2021, párr. 1).

### **2.3.1. Factores que Influyen en la Cristalización**

Un ejemplo básico del proceso de cristalización es el que se muestra en la Figura 8, el cual da cuenta de los factores que afectan al proceso. Debido a que cada uno de dichos factores altera el proceso de diferente forma, se hace necesario investigar la influencia de cada uno.

#### **2.3.1.1. Grado de Sobresaturación**

El grado de sobresaturación se consigue por medio del cambio de temperatura de la solución, ya sea enfriamiento o calentamiento, evaporación del solvente, posibles cambios en el pH o agregado de precipitantes, además de ser la fuerza impulsora que determina el crecimiento del sólido (cristal), es decir, si la sobresaturación es baja se logran crecimientos superficiales, por otro lado, si llega a ser extremadamente alta se generan crecimientos amorfos. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

#### **2.3.1.2. Solvente**

Este factor es el causante principal del mecanismo de crecimiento de los cristales, por lo que se debe escoger adecuadamente y revisar cuál es el adecuado para promover el proceso de cristalización. Esto se hace mediante el punto de ebullición del disolvente, dado que este tiene que estar por debajo del punto de fusión del soluto para que se pueda dar la cristalización. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

#### **2.3.1.3. Zonas de Nucleación**

Se busca disminuir la cantidad de zonas que presentan la nucleación, debido a que se formarán cristales más pequeños. Una forma de evitar esto es reduciendo las impurezas que generan núcleos de formación; también se puede controlar mediante el enfriamiento, debido a

que un enfriamiento rápido promueve la formación de varias zonas de nucleación. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

#### **2.3.1.4. Agitación y Tiempo**

Un mayor tiempo provoca menos sitios de nucleación y, por lo tanto, la formación de cristales de un mayor tamaño y mayor pureza. Es de suma importancia, debido que al tener tiempos muy largos se propician mejores cristales, por otro lado, se ha evidenciado que la agitación no es tan deseable. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

#### **2.3.1.5. Impurezas**

Influyen en el desarrollo del cristal sobre el hábito cristalino, este se define como la forma que resulta del desarrollo de las caras del cristal, sin embargo, si la impureza llega a ser menos soluble es posible separarse por medio de filtración una vez esté cristalizado. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

#### **2.3.1.6. Velocidad de Cristalización**

Solo puede ocurrir en soluciones sobresaturadas donde este factor es clave debido a que la diferencia de velocidades genera que el cristal adquiera diferente forma y estructura. Por ejemplo, cuando se está en la región metaestable, la nucleación se puede dar por diferentes factores como la fricción, lo que causa una nucleación secundaria por lo que implica el rompimiento de los cristales ya formados. (Melo y Ochoa, 2021, p. 36)

### **2.3.2. Cristalización en el Sistema Sulfato de Cobre–Ácido Sulfúrico–Agua**

El sulfato de cobre pentahidratado es genéricamente el compuesto químico de cobre más importante a nivel industrial, al cual se le conoce desde épocas remotas como vitriolo azul. A partir de él se prepara la mayor parte de todas las demás sales de cobres usadas para fines industriales especiales como otros sulfatos, óxidos, carbonatos, cloruros y oxiclорuros. (Tabilo, 2012, p. 18)

### **2.3.3. Formas Comerciales más Importantes de Sulfato de Cobre**

Entre las formas comerciales más importantes de sulfato de cobre se encuentran las siguientes:

- Sulfato de cobre anhidro:  $\text{CuSO}_4$
- Sulfato de cobre monohidratado:  $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Sulfato de cobre pentahidratado:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Este último puede cristalizar con facilidad desde soluciones acuosas, formando grandes cristales azules de estructura triclinica, o bien controlando la granulometría como pequeños cristales celestes conocidos como sulfato tipo nieve, el cual, al aplicársele calor a los 110 °C, pierde moléculas de agua para formar un monohidrato de color blanco verdoso y, posteriormente, a 250 °C forma la correspondiente sal anhidra que es absolutamente blanca.

El sulfato de cobre cristalino que se comercializa en la generalidad de los casos se produce a partir de soluciones acuosas de sulfato de cobre, principalmente, en cristalizadores por enfriamiento o en bateas. Típicamente las soluciones se preparan comercialmente haciendo circular una solución de ácido sulfúrico por una torre que contiene gránulos metálicos de cobre secundario (recortes de alambres chatarra y otros despuntes industriales) de hasta 5.08 cm de diámetro, mientras que en forma simultánea circula aire en contracorriente para oxidar gradualmente el cobre metálico a ion cúprico,  $\text{Cu}^{2+}$ . La mayoría de las impurezas se acumulan en la solución como un barro, el cual es filtrado y retirado para la eventual recuperación de metales preciosos si los hubiere.

Otras formas alternativas para lograr soluciones concentradas del sulfato de cobre incluyen:

- Descarte de electrolito desde la nave electrolítica de una refinería, ER.
- Soluciones de lixiviación de mata de cobre o de cementos de cobre.
- Soluciones concentradas de lixiviación directa de minerales de cobre de alta ley o de concentrados sometidos previamente a tostado.
- Soluciones de electrolito rico obtenido en la etapa de descarga de la extracción por solventes. (Tabilo, 2012, pp. 18-19)

### 2.3.4. Geometría del Crecimiento del Cristal

Desde el punto de vista industrial, el término hábito del cristal se refiere a los tamaños relativos de las caras de un cristal. Si bien no se ha descubierto una ley general que controle el hábito del cristal, el hábito de varios productos tiene gran importancia. Los cristales largos tipo aguja tienden a romperse con facilidad durante la centrifugación y el secado, mientras que los cristales planos tipo placa son difíciles de lavar durante la filtración y el secado. Los cristales planos tipo placa son difíciles de lavar durante la filtración o centrifugación y dan por resultado bajas velocidades de filtración, los cristales complejos o de tipo gemelos tienden a romperse más fácilmente durante el transporte que los cristales gruesos y compactos, los cristales esféricos (causados la mayoría de las veces por frotación durante el crecimiento) tienden a ser considerablemente menos difíciles de manejar en la formación de la torta que los cúbicos u otros con tamaños compactos.

En la cristalización del sulfato de cobre las impurezas vienen con la solución de alimentación al cristalizador debido a una extracción junto al cobre, o bien por un arrastre físico desde el material de alimentación a la lixiviación. En general, estas impurezas afectan los hábitos de los cristales y los niveles de impurezas del producto debido a una serie de complicados fenómenos de superficie.

El hierro y el ácido sulfúrico son las impurezas más comunes en los circuitos de cristalización de sulfato de cobre, ambos tienden a reducir el tamaño, a alterar el hábito e incrementar el nivel de impurezas (arrastres de orgánico) en los cristales de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  del producto. Estas dos impurezas pueden ser removidas extendiendo el proceso de lixiviación hasta que casi todo el ácido sulfúrico se consuma, o por neutralización con un compuesto de características alcalinas como el óxido de cobre o caliza. El hierro también puede ser dejado en la solución si es acomplejado con varios agentes como los iones fluoruros.

Otras impurezas, como el antimonio, el arsénico, el cobalto, el níquel, el sodio y el zinc, normalmente son descartadas o removidas en procesos separados. Todas estas técnicas deberían ser innecesarias si el circuito de extracción por solventes se encuentra operando con la adecuada selectividad, debiendo ser está contemplada en las etapas de diseño. Debido a que los tamaños relativos de las caras individuales de un cristal varían entre límites amplios, se deduce que caras diferentes deben tener distintas velocidades de translación. Una ley geométrica del crecimiento del cristal, conocida como principio de traslape, se basa en estas diferencias de las velocidades, en el crecimiento de un cristal solo las caras que tienen las velocidades de translación más bajas son las que sobreviven y al disolver un cristal solo

sobreviven las caras que tienen las velocidades de traslación más altas. (Morales, 2015, pp. 30-31)

### **2.3.5. Pureza del Producto**

Si un cristal se produce en la región del diagrama de fase en la que se precipita la composición de un solo cristal el cristal mismo será puro, por lo general, siempre y cuando el crecimiento se dé con velocidades relativamente bajas y en condiciones constantes. En muchos productos estas purezas se aproximan a un valor de 99.5 % a 99.8 %, la diferencia entre este valor y una pureza de 100 % es generalmente el resultado de pequeñas bolsas de licor madre llamadas oclusiones atrapadas dentro del cristal. Para incrementar la pureza del cristal más allá del punto en que por lo general se esperan estas oclusiones (aproximadamente 0.1 % a 0.5 % en volumen) es necesario reducir las impurezas en el mismo licor madre hasta un nivel aceptable para que el licor madre contenido en estas oclusiones no tenga suficientes impurezas para causar la formación de un producto impuro, por lo general es necesario recrystalizar el material de una solución que es relativamente pura para superar este tipo de problema de pureza. (Morales, 2015, pp. 32-33)

Uno de los problemas que enfrentan el usuario o el diseñador del equipo de cristalización es la distribución esperada del tamaño de partícula y la forma para describir adecuadamente esta distribución. La mayor parte de las distribuciones de productos cristalinos al graficarlas en papel aritmético-probabilístico son rectas en buena parte de la distribución graficada. (Morales, 2015, p. 34)

### **2.3.6. Velocidad de Crecimiento del Cristal**

El crecimiento del cristal es un proceso capa por capa. Debido a que el crecimiento solo puede ocurrir en la cara del cristal es necesario transportar material a la cara desde la solución, por consiguiente, debe considerarse la resistencia de difusión al desplazamiento de las moléculas (o iones) hacia la cara creciente del cristal y la resistencia a la integración de estas moléculas a la cara. Como se matizó antes, caras diferentes pueden tener velocidades de crecimiento distintas y estas se pueden alterar de forma selectiva mediante la adición o eliminación de impurezas.

Para el caso del sulfato de cobre pentahidratado, después de la nucleación inicial, cada núcleo crece y es arrastrado al flujo del producto o es acumulado en el interior de un cristizador tipo para las condiciones económicas actuales. Este último proceso es poco rentable, por lo que

en este sentido es un problema importante para la minería a esta escala. (Morales, 2015, pp. 35-36)



uniforme de máximo  $\frac{1}{2}$  " de pulgada. Para obtener la granulometría deseada y debido a la cantidad diaria de mineral a procesar se configuró una planta diseñada por 2 chancadores y un harnero vibratorio.

Las 200 toneladas de mineral oxidado con aproximadamente 1.7 % de cobre fueron ingresadas al triturador primario tipo mandíbula, el cual redujo el tamaño a partículas con valores iguales o menores de 1 pulgada. El producto del chancado primario fue conducido mediante una correa transportadora hacia el harnero vibratorio, el cual, mediante estratificación y separación, clasifica el mineral según su granulometría.

Las partículas bajo  $\frac{1}{2}$  pulgada son enviadas directamente a la pila de finos mientras que el mineral sobre malla es enviado a un chancador secundario para obtener la granulometría deseada.

### **3.1.2. Etapa de Aglomerado y Curado**

Continuando con el proceso es necesario permeabilizar el lecho de partículas que conformarían la pila de lixiviación, con el fin de asegurar una buena percolación y dispersión de la solución lixivante. Para ello el mineral se sometió a un proceso de aglomeración por humedad, el cual consiste en humedecer el mineral chancado con agua y ácido hasta alcanzar una tensión superficial suficiente, así, al colisionar las partículas entre sí, las más finas se adhieren a las gruesas formando *pellets* de un tamaño uniforme que aumenta la permeabilidad y mejora la cinética de extracción. Luego se realiza el curado que consiste en rociar con el solvente (ácido sulfúrico) el mineral previamente chancado, seguido de un periodo de "curado" o reposo.

Estas operaciones se realizan en un tambor aglomerador inclinado que gira a baja velocidad, ocasionando el deslizamiento y la aglomeración del mineral previamente mojado con agua y el ácido concentrado, con lo cual se logra el acondicionamiento uniforme del lecho de mineral. Los aspectos más destacados de esta etapa, con respecto a la dosificación de ácido y humedad deseada del mineral, se muestran en la siguiente tabla.

### **3.1.3. Etapa de Lixiviación**

Se escogió el sistema de pilas permanentes de lixiviación. El área de lixiviación donde se dispusieron las pilas se acondiciona y se compacta considerando una inclinación suficiente para

que la solución escurriera por gravedad desde su parte inferior. Estas pilas se construyen sobre una geomembrana de polietileno (HDPE) en cuya base se encuentra instalado un sistema de cañerías (corrugadas y perforadas) debidamente espaciadas para facilitar el escurrimiento de la solución rica en mineral de cobre (PLS).

El riego se realiza con solución ácida pobre en mineral de cobre (refino) que tiene una red de aspersores que van lixiviando el mineral paulatinamente a medida que este desciende por la matriz porosa con una dirección de flujo predominantemente vertical. Posteriormente, transcurridos 60 días aproximados, la solución, ahora rica en cobre, es captada en la base de la pila a través de un sistema de drenaje que permite transportarla hacia unos estanques de recolección o piscinas de PLS. De manera adicional, se contempló la construcción de dos piscinas auxiliares para contener las soluciones en caso de que ocurrieran contingencias o emergencias.

### 3.1.4. Etapa de Extracción por Solvente (SX)

El proceso de extracción por solvente (SX) implica la extracción selectiva del cobre disuelto en forma de iones dentro de una fase acuosa proveniente, para este caso de lixiviación, hacia otra fase líquida inmiscible con ella, la cual es conocida como fase orgánica (extractante más diluyente). Luego se separa por decantación la fase orgánica cargada de cobre de la solución acuosa o refinado empobrecido en cobre.

#### 3.1.4.1. Extractante y Diluyente

Mediante un estudio bibliográfico se determinó que el reactivo extractante a utilizar para este proceso debía ser el LIX 984N, el cual, al ser un extractante de tipo mezcla cetoxima/aldoxima, posee excelentes propiedades quelantes y selectivas con el ion  $\text{Cu}^{2+}$ . Sus características principales, de acuerdo con la empresa Solvay que provee este tipo de extractantes, se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3. Características generales del extractante LIX 984N**

Característica	Valor
Densidad	0.91 g/cm <sup>3</sup>
Color	Ámbar

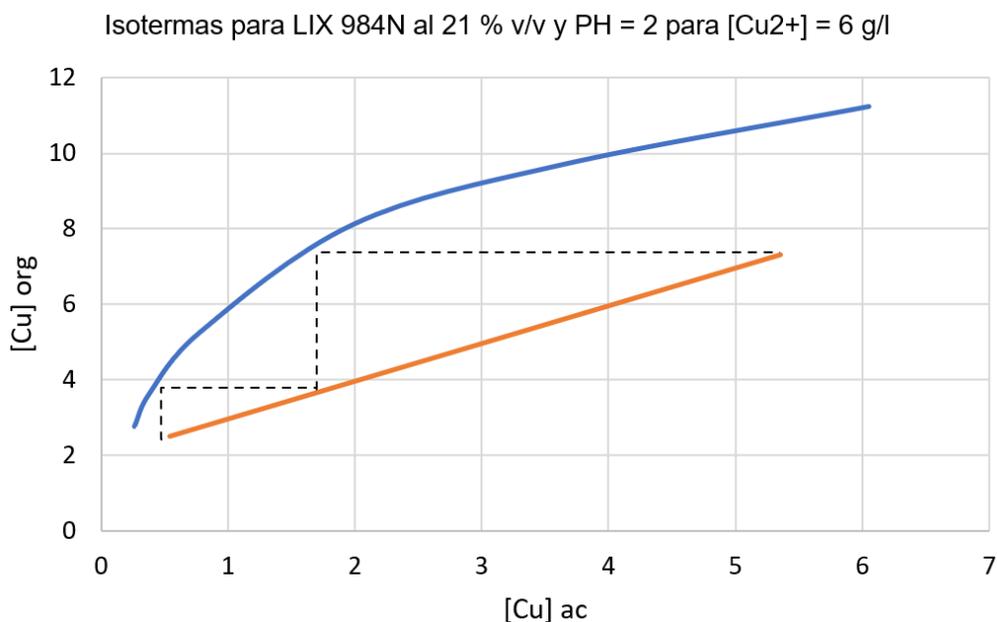
Punto de inflamación	70 [0 °C]
Selectividad Cu/Fe	Mayor de 2000
Separación de fases	Menor de 90 segundos
Cinética de extracción	Mayor del 95 % en 60 segundos

“Los extractantes comerciales debido a su alta viscosidad, requieren de un diluyente para llevarlo a una concentración deseada” (Gahona, 2011, p. 45) siendo, a su vez, el medio que permita la formación del complejo orgánico-metálico en el proceso de extracción. El diluyente considerado es el ESCAID 103.

La isoterma de extracción considerada para el proceso se obtuvo de la Tabla 4 y su gráfico se muestra en la Figura 9 adjunta a continuación.

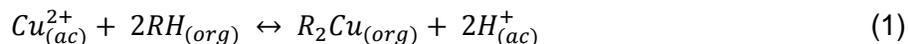
**Tabla 4. Resultado de las isotermas para LIX 984N al 21 % v/v y PH = 2 para [Cu<sup>2+</sup>] = 6 g/l (Gahona Gallardo, 2011)**

Razón O/A	Cu ac	Cu org.
2	0.26	2.77
3/2	0.38	3.65
1	0.78	5.27
1/2	1.99	8.12
1/5	3.63	9.69
Carga máxima	6.05	11.23



**Figura 9. Isoterma de extracción para LIX 984N al 21 % v/v y PH = 2 para [Cu<sup>2+</sup>] =6 g/l (Gahona, 2011)**

Durante el proceso claramente se pueden distinguir dos etapas de extracción, lo cual se traduce en el proceso de extracción a dos equipos mezclador-decantador. La ecuación que gobierna el proceso es la siguiente:



Al mezclador-decantador 1 ingresa el PLS proveniente del estanque de acumulación de PLS y el orgánico semi-cargado proveniente del mezclador-decantador 2, además, sale el orgánico cargado hacia el coalescedor de orgánico, el cual facilita la separación y agrupación del acuoso remanente arrastrado como microgotas desde el orgánico cargado. Al mezclador-decantador 2 ingresan el orgánico descargado del post-decantador de orgánico descargado y también el PLS proveniente del mezclador-decantador 1; este mezclador-decantador envía el orgánico semi-cargado al mezclador-decantador 1, y el refino al post-decantador de refino.

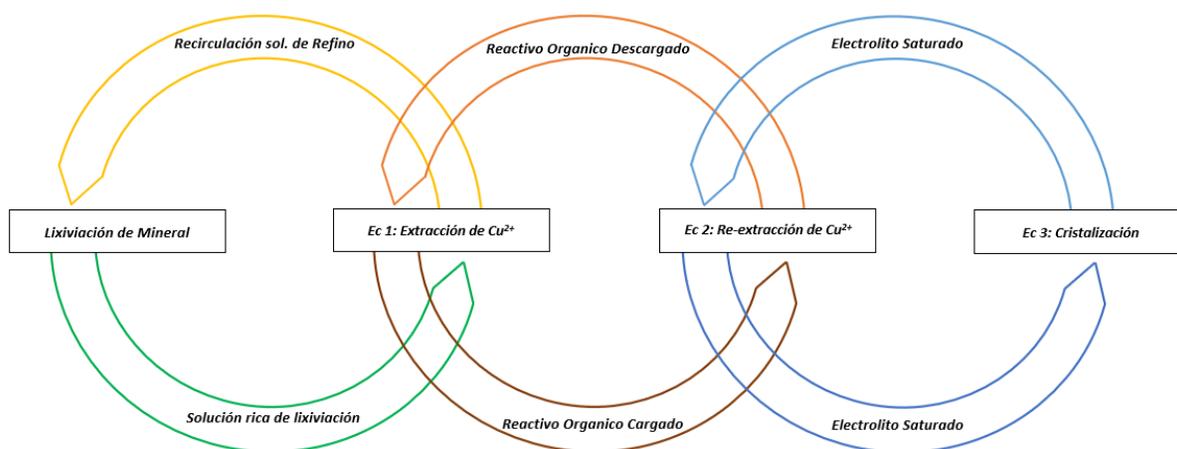
Todo el refino en este proceso es enviado al post-decantador de refino, el cual separa el refino (enviado a las piscinas de refino para ser usado en la lixiviación) del orgánico descargado (que es devuelto al post-decantador de orgánico descargado) y las borras obtenidas.

### 3.1.5. Etapa de Reextracción y Cristalización

El orgánico cargado proveniente del estanque de orgánico cargado se mezcla con la solución acuosa saturada proveniente del estanque de electrolito saturado, esto ocurre en un mezclador-decantador donde se da simultáneamente la reextracción y la cristalización. El medio ácido de lavado obliga al orgánico a ceder el cobre al electrolito, pero este, a su vez, al estar sobresaturado ya no tiene capacidad de contenerlo, iniciando así la cristalización del cobre en el interior del mezclador-decantador. Mientras exista la acidez adecuada en la reextracción será favorable la producción de sulfato de cobre. Las ecuaciones que gobiernan esta etapa son las siguientes:



En este proceso se generan virtualmente tres fases debido a sus diferentes densidades. En la parte superior se encontraría el orgánico ya descargado, el cual será evacuado de los cristalizadores mediante rebose y llevado a un post-decantador de orgánico descargado para, posteriormente, ser limpiado de sus impurezas y retornar al proceso de extracción. En la zona intermedia del proceso de cristalización se encontrará el electrolito saturado, el cual también será evacuado mediante rebose para ser constantemente recirculado en esta.



**Figura 10.** Diagrama de flujo esquemático para la producción de sulfato de cobre pentahidratado (Juárez, 2010)

La pulpa de sulfato de cobre es descargada del equipo decantador cristalizador y enviada a un estanque de lavado de cristales que cumple la función de separar mecánicamente los cristales de sulfato de gotas de orgánico impregnado. En este equipo la pulpa es lavada con agua para generar una separación mecánica entre los cristales y las impurezas, lo cual da paso a una rápida nucleación de los cristales.

Una vez está libre de orgánico la pulpa es enviada a una centrífuga continua para remover, a través del lavado con agua, el ácido sulfúrico remanente que se encuentra en ella. Este proceso de centrifugado y eliminación de las últimas impurezas potenciales en la producción optimizan aún más el proceso de nucleación de los cristales de sulfato de cobre. El agua de proceso que se obtiene en esta etapa es recirculada al lavador de cristales.

El sulfato, ahora con un porcentaje del 5 % al 10 % de agua, es enviado a un secador rotatorio con la finalidad de reducir la humedad de los cristales a menos del 1 %. Solo para la producción de sulfato de cobre de grado alimenticio es necesario disponer de un mezclador de sólidos Dry Blender para la adición de un 1 % a un 2 % de  $\text{NaCO}_3$ , y de un harnero vibratorio para clasificar y envasar el producto en sacos de 50 libras o en maxisacos.

### 3.2. Criterios de Diseño

A continuación, se describen y consideran todos los criterios de diseño para la producción de sulfato de cobre pentahidratado a partir de una dotación de mineral diario de 200 toneladas, considerando los aspectos más esenciales en el proceso productivo, así como las pérdidas por evaporación, arrastre e inclusión de agentes contaminantes o indeseados.

#### 3.2.1. Lixiviación

**Tabla 5. Criterios para el diseño de la planta de lixiviación**

Parámetro	Diseño	Unidad
Densidad aparente	1.6	TM/m <sup>3</sup>
Duración del ciclo de lixiviación	60	días
Altura pila	3	m
Tasa de evaporación	8	l/m <sup>2</sup> /día
Humedad del aglomerado	7	%
Ácido en curado	6	kg H <sup>+</sup> /TMS
Ácido en riego	29	kg H <sup>+</sup> /TMS

Ley de cobre en mineral	1.7	%
Tasa de riego	10	l/m <sup>2</sup> /h
Eficiencia de lixiviación	85	%

Nota. Criterios de diseño recopilados de plantas de pequeña minería y recomendaciones del profesor patrocinante

### 3.2.2. Extracción por Solvente

Tabla 6. Criterios para el diseño de la planta de extracción por solvente

Parámetro	Diseño	Unidad
Concentración de cobre en refino	0.54	g/l
Eficiencia de extracción	89.92	%
Capacidad de transferencia del reactivo	0.52	g Cu / L•1 % v/v
Concentración de cobre en orgánico descargado	2.5	g/l
Relación O/A global	1	
Extractante en la fase orgánica	21	%
N° de etapas en extracción	2	
N° de etapas en re-extracción	1	
Continuidad global	Orgánica acuosa	
Densidad de diluyente	0.81	g/cm <sup>3</sup>
Densidad del extractante	0.91	g/cm <sup>3</sup>

Nota. Criterios de diseño recopilados de plantas de pequeña minería y recomendaciones del profesor patrocinante

### 3.2.3. Arrastre de Fases y Evaporación

Tabla 7. Criterios para el diseño de arrastre de fases, retenciones y pérdidas por evaporación

Parámetro	Diseño	Unidad
Orgánico en acuoso (de E-2 a post-decantador de refino)	100	ppm
Retención de arrastre orgánico en post-decantador	75	%
Orgánico en pulpa	0.5	%
Evaporación de solvente en mezcladores	1.5	l/m <sup>2</sup> /día
Evaporación de solvente en decantadores y tanques	0.8	l/m <sup>2</sup> /día

Nota. Criterios de diseño recopilados de plantas de pequeña minería y recomendaciones del profesor patrocinante

### 3.2.4. Cristalización

**Tabla 8. Criterios para el diseño de la planta de cristalización**

Parámetro	Diseño	Unidad
Concentración de cobre en electrolito saturado	30	g/l
Concentración de ácido en electrolito saturado	300	g/l
Razón o/a en mezclador CR	3	
Continuidad en mezclador CR	Orgánica	

Nota. Criterios de diseño recopilados de plantas de pequeña minería y recomendaciones del profesor patrocinante

### 3.3. Balance de Masa

La elaboración de la planta de beneficio lleva ligado un balance de materia que permite determinar los flujos de entrada y salida de los insumos presentes en cada etapa del proceso productivo, así como las pérdidas presentes en el mismo.

#### 3.3.1. Aglomeración y Lixiviación

**Tabla 9. Resultados del balance en las etapas de aglomeración y lixiviación**

Parámetro	Diseño	Unidad
Mineral a producción	200	t/día
Cobre recuperado	3.12	t/día
Ácido sulfúrico en aglomerado	1.20	t/día
Agua consumida en aglomeración	14.94	t/día
Volumen de pila de lixiviación	8105.08	m <sup>3</sup>
Área de lixiviación	3545.81	m <sup>2</sup>
Evaporación en área de lixiviación	28.37	t/día
Concentración de cobre en PLS	5.36	g/l
Ácido necesario para lixiviación	5.80	t/día
Concentración de ácido en refino	7.42	g/l

### 3.3.2. Extracción por Solvente

Tabla 10. Resultados del balance en la etapa de extracción por solvente

Parámetro	Diseño	Unidad
Caudal de PLS	648.41	m <sup>3</sup> /día
Finos de cu en PLS	3.47	t/día
Cobre extraído en SX	3.12	t/día
Recirculación de acuoso en E-1	10	%
Caudal de recirculación acuoso en E-1	64.84	m <sup>3</sup> /día
Acuoso total a E-2	648.41	m <sup>3</sup> /día
Finos de Cu en refino	350.14	t/día
Caudal de refino	648.41	m <sup>3</sup> /día
Caudal de orgánico	648.41	m <sup>3</sup> /día
Cobre transferido al orgánico	3.12	t/día
Recirculación de orgánico en E-2	10	%
Caudal de recirculación orgánico en E-2	64.84	m <sup>3</sup> /día
Arrastre de orgánico en refino	0.06	m <sup>3</sup> /día
Transferencia neta de cobre por el orgánico	4.82	g/l
Concentración de reactivo en orgánico	21 %	v/v
Finos de cobre total en electrolito saturado	6.48	t/día
Ácido generado en sx	4.81	t/día
Evaporación de solvente desde equipos	0.05	m <sup>3</sup> /día
Tasa de reposición de extractante	3.63	l/día
Tasa de reposición de solvente	13.71	l/día

### 3.3.3. Cristalización

**Tabla 11. Resultados del balance en la etapa de cristalización**

Parámetro	Diseño	Unidad
Caudal de orgánico cargado	648.41	m <sup>3</sup> /día
Caudal de electrolito saturado	216.14	m <sup>3</sup> /día
Cobre extraído desde OC en SX-CR	3.12	t/día
Agua requerida para el proceso de cristalización	4.42	t/día
Ácido requerido para el proceso de cristalización	4.82	t/día
Producción de pulpa de cristales al 30 % p/p	41.65	t/día
Orgánico retenido en pulpa antes de lavado	0.21	t/día
Producción de pulpa lavada a centrifuga	40.82	t/día
Solución saturada desde centrífuga	1.14	m <sup>3</sup> /h
Producción de sulfato centrifugado con 4 % de H <sub>2</sub> O	12.50	t/día
Agua de lavado de cristales en centrífuga	1.50	t/día
Agua total requerida en cristalización	2.92	t/día
Agua total requerida por el proceso	46.23	t/día
Ácido total requerido por el proceso	7.01	t/día

## 3.4. Parámetro de Dimensionamiento de Equipos

### 3.4.1. Área de Chancado

Las consideraciones del mineral proveniente de la mina presentan una granulometría que alcanza los 0.5 m de diámetro, con la finalidad de ser reducido mediante el proceso de chancado en seco hasta alcanzar un tamaño de aproximadamente 1/2 pulgada. La planta fue diseñada para una capacidad de 200 TPD y 8 horas de trabajo por día, además se considera un sobredimensionamiento mínimo de un 10%. Sin embargo, para esta área de la planta se consideraron algunos de los equipos de menor capacidad disponibles en el mercado. A continuación, se describen los equipos utilizados para considerar el tamaño deseado de la planta de chancado.

### 3.4.1.1. Chancador Primario

Trituradora de mandíbula modelo PE 500 x 750 cuyas características se indican en la tabla 12.

**Tabla 12. Características del chancador primario**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	45 - 100	t/h
Alimentación máxima	425	mm
Velocidad	275	rpm
Tamaño	500 x 750	mm
Potencia	55	kW

### 3.4.1.2. Chancador Secundario

Chancador secundario tipo cono estándar modelo Nordberg Serie HP 100 cuyas características se señalan en la siguiente tabla.

**Tabla 13. Características del chancador secundario**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	155	t/h
Alimentación máxima	150	mm
Lado cerrado de reglaje	13	mm
Potencia	90	kW

### 3.4.1.3. Harnero Vibratorio

Harnero vibratorio tipo vibratorio inclinado modelo 3YK - 1245 cuyas características se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 14. Características del harnero vibratorio**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	15 - 80	t/h
Alimentación	200	mm

No. De decks	1	
Inclinación	10 - 20	%
Potencia	11	kW
Frecuencia de vibración	850	rpm
Tamaño de pantalla	1200 x 4500	mm

#### 3.4.1.4. Cintas Transportadoras

Se seleccionaron cintas transportadoras cuyas características se señalan en la siguiente tabla.

**Tabla 15. Características de la cinta transportadora**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	30 - 60	t/h
Ancho de correa	400	mm
Largo	12	m
Potencia	2.2	kW
Velocidad	1.25 - 2	m/s
Cantidad	4	

#### 3.4.2. Área de Lixiviación y Aglomerado

##### 3.4.2.1. Aglomerado y Curado

Para la producción de un mineral que sea permeable y genere una buena percolación sin escurrimiento, el material previamente chancado debe ser sometido primeramente a aglomeración para cohesionar las partículas de mineral de menor granulometría a aquellas de mayor tamaño. Seguido a ello, el mineral debe ser rociado con solvente ácido para acondicionar el material a lixiviar. A continuación, se describen las características del tambor de aglomerado.

**Tabla 16. Características del tambor aglomerador**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	7.8	m <sup>3</sup> /h
Tiempo de residencia	60	s
Porcentaje de llenado	10	%
Relación L/D	3	
Potencia	20	kW
Diámetro	1.8	m
Largo	5.47	m

La cinta transportadora cuyas características se señalan en la siguiente tabla.

**Tabla 17. Características de las cintas transportadoras**

Variable	Diseño	Unidad
Capacidad	30 - 60	t/h
Ancho de correa	400	mm
Largo	12	m
Potencia	2.2	kW
Velocidad	1.25 - 2	m/s
Cantidad	1	

### 3.4.2.2. Configuración de las Pilas

Se dispuso de la preparación de dos sectores, cada uno con un área basal aproximada de 3.023 m<sup>2</sup>, en los cuales se ubican las pilas permanentes, es decir, el mineral una vez lixiviado será dejado en el mismo lugar. Cada pila de lixiviación de óxidos ha sido diseñada para un periodo de 60 días en un área activa capaz de almacenar 12.968 t de mineral donde se ubicará conformando el tipo de pila permanente, la cual tendrá una altura de 3 m y un talud de 35°, y estará situada sobre un terreno previamente dispuesto y compactado con una inclinación lateral de un 1% y una pendiente longitudinal de un 3 % que facilitará el drenaje y la evacuación de las soluciones. A continuación, se presentan las características de las pilas (ver Tabla 20).

**Tabla 18. Características de diseño para cada pila de lixiviación**

Variable	Diseño	Unidad
Ancho de corona	34.6	m
Largo de corona	69.2	m
Ancho de base	38.9	m
Largo de base	77.7	m
Ángulo de talud	35	%
Área de la corona	2393	m <sup>2</sup>
Largo de talud	5.23	m
Área talud, lado corto	192	m <sup>2</sup>
Área talud, lado largo	384	m <sup>2</sup>
Superficie de riego	3546	m <sup>2</sup>
Área basal	3023	m <sup>2</sup>

El cimiento de cada pila estará formado por una base de 15 cm a 20 cm de relaves de baja permeabilidad, constituidos principalmente de limos y arcillas de granulometría final. Sobre esta capa se dispondrá de un sistema de revestimiento que consiste en la instalación de una geomembrana de polietileno (HDPE) de 2 mm, la cual es resistente a ataques de agentes químicos y radiación ultravioleta, de larga vida útil y presenta una elevada rigidez junto a una baja permeabilidad a fluidos y gases.

Las tuberías de drenaje de aproximadamente 60 mm de diámetro, constituidas principalmente de material de HDPE y ubicadas bajo la pila, tendrán una separación estimada de 2 m cada una y están destinadas a permitir una rápida evacuación de la solución una vez alcanzado el fondo de la pila hacia las canaletas de recolección de PLS que se encuentran situadas bajo la pila. De ese modo, con el uso de estas tuberías, se evita la inundación de la pila y se permite la inoculación de aire por las zonas inferiores.

Se implementará un sistema por goteo que irriga la solución ácida a una tasa de 10 l/h-m<sup>2</sup> sobre un área de 3 545.81 m<sup>2</sup>. La solución de PLS colectada en canaletas de recolección perimetral será enviada mediante tuberías de drenaje de 110 mm de diámetro a los estanques de almacenamiento de PLS. Estas canaletas están revestidas con una película de geomembrana de polietileno HDPE de 1 mm de espesor y poseen una sección transversal cuadrada de 0.8 mm x 0.8 mm.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el sistema de pilas es permanente, no se considera mover los rípios del lugar de lixiviación, por lo menos, hasta el futuro plan de cierre.

Las piscinas destinadas para contener PLS son de tipo cuadradas y sus dimensiones tendrán 29 m de ancho superior, una profundidad de 4.1 m con una pendiente de 45° y un ancho inferior de 9.7 m. Cada una de estas piscinas estará revestida con una geomembrana de HDPE, con un espesor de 1.5 mm, la cual será anclada de forma segura a la corona de las piscinas. Cabe mencionar que la disposición de estas dos piscinas se consideró para usar una de ellas como estanque de contingencia en caso de que se presente un fallo en alguna bomba o en el mantenimiento de los equipos. Estas piscinas de refino dispondrán de la misma configuración que las piscinas de PLS.

### 3.4.3. Área de SX, Cristalización y Embalaje

#### 3.4.3.1. Extracción por Solvente (SX)

El área de extracción por solventes consta principalmente de 2 equipos conectados en serie cuyos flujos de PLS y orgánico que ingresa en contracorriente logrando una eficiencia de extracción de aproximadamente un 90%.

Las características de los equipos se muestran a continuación:

**Tabla 19. Característica de equipos mezcladores**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal	54.03	m <sup>3</sup> /h
Tiempo de residencia	3	min
Razón O/A	1	
Volumen de diseño	3,11	m <sup>3</sup>
Diámetro interno	1,6	m
Altura interna	1,8	m
Espesor pared	10	mm
Factor de seguridad	15	%
Cantidad	2	Unidades

**Tabla 20. Característica de equipos mezcladores**

Variable	Diseño	Unidad
Flujo específico	3	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
Velocidad de carga de orgánico	1.25	cm/s

Área	18	m <sup>2</sup>
Relación L/A	2	
Ancho interior	3	m
Largo interior	6	m
Altura total	1	m
Ancho de canal orgánico	0.2	m
Ancho de canal acuoso	0.25	m
Ancho salida de acuoso	0.3	m
Largo total de decantador	6.75	m
Cantidad	2	Unidades

El producto de este proceso corresponde a una fase orgánica rica en cobre (orgánico cargado), el cual es purgado de impurezas mediante un coalescedor cuyas características se describen a continuación.

**Tabla 21. Característica de coalescedor de orgánico cargado.**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal de orgánico	27.02	m <sup>3</sup> /h
Tiempo de residencia	10	min
Volumen diseño	4,50	m <sup>3</sup>
Relación L/D	1	
Diámetro	2	m
Alto manto	2	m
Alto cono	2	m

El segundo resultado del proceso es un flujo acuoso de refino con baja concentración en cobre que es utilizado en lixiviación, el cual es previamente tratado para la eliminación de agentes contaminantes en un equipo Postdecantador de refinos. Las especificaciones del equipo son descritas en la tabla 22.

**Tabla 22. Característica de post decantador de refino.**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal	27.02	m <sup>3</sup> /h
Flujo específico	7	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
Área interior	3.86	m <sup>2</sup>
Relación l/a	1.25	
Ancho interior	2	m
Largo interior	2	m
Alto	1	m

Ancho de canaleta de salida de orgánico	0.1	m
Ancho de canaleta de salida de acuoso	0.3	m
Largo total del decantador	2.4	m

### 3.4.3.1. Cristalización y Embalaje

El reactor encargado de la cristalización es cargado tanto con orgánico cargado como con una solución de electrolito saturado en cobre para dar inicio al proceso de nucleación y crecimiento de cristales. La pulpa descargado en el fondo del decantador del reactor pasa a través a un tanque lavador que elimina el orgánico arrastrado en esta etapa para luego deshumedecer el sulfato de cobre pentahidratado ya formado mediante un centrifugado y secado. Finalmente, la sal antes mencionada es clasificada, tamizada y embalada para su venta y distribución.

Las característica de los equipos anteriormente mencionado se describen a continuación.

**Tabla 23. Característica de equipos mezclador cristalizador.**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal	36.02	m <sup>3</sup> /h
Tiempo de residencia	3	min
Factor de seguridad	15%	
Volumen interior	1.80	m <sup>3</sup>
Diámetro	1.32	m
Altura	1.32	m
Altura de rebose	0.20	m
Altura total	1.52	m
Volumen total	2.07	m <sup>3</sup>

**Tabla 24. Característica de decantador cristalizador**

Variable	Diseño	Unidad
Flujo específico	3	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
Área interior	12	m <sup>2</sup>
Relación L/A	2	
Ancho interior	2.5	m
Largo interior	5	m
Alto	1	m
Altura capa orgánico	0.2	m

Altura del cono	2	m
Ancho de canaleta de salida de orgánico	0.3	m
Ancho de canaleta de salida de acuoso	0.3	m
Largo total del decantador	5.6	m

**Tabla 25. Características del lavador de cristales.**

Variable	Diseño	Unidad
Volumen de diseño	3.5	m <sup>3</sup>
Relación L/A	1	
Diámetro	1.5	m
Altura del cilindro	1.5	m
Altura de cono	1.5	m
Tiempo de lavado	30	min

**Tabla 26. Características de secador rotatorio.**

Variable	Diseño	Unidad
Horas de operación	20	h/día
Carga máxima	1	t/h
Potencia	54	kW
Largo	12.5	m
Alto	10	m
Ancho	8	m

**Tabla 27. Características de balanza de pesaje de maxi sacos.**

Variable	Diseño	Unidad
Ancho plataforma	1.2	m
Largo plataforma	1.2	m
Capacidad	5000	kg
Potencia	0.5	hp

## 4. CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación de proyectos es una herramienta de gestión que se emplea en el proceso de planificación para asignar recursos y presupuestos de acuerdo con la necesidad del plan de negocios establecido, proceso que tiene una duración predeterminada y establecida dentro del marco general del programa. Esta evaluación es un modelo predictivo de lo que podría llegar a pasar si la idea de negocio se concreta, la cual se ejecuta a través de indicadores económicos que facilitan la rentabilidad de estas posibles inversiones.

En este capítulo se presenta la evaluación económica correspondiente a la propuesta de implementación de la planta de producción de sulfato de cobre pentahidratado a partir de la producción media de una pequeña empresa minera. Para efectuar esta evaluación se consideraron tanto los costos asociados a la inversión de esta propuesta como los asociados a la operación de esta, lo cual ha permitido saber si la ejecución de la propuesta es factible técnica y económicamente, siendo este último aspecto entregado por el análisis de los indicadores de proyectos VAN y TIR.

### 4.1. Parámetros

**Periodo de evaluación:** Es el periodo de tiempo que se estima para realizar el estudio de la evaluación económica, donde se calculan todos los ingresos y egresos a partir del proyecto estudiado. En este caso se decidió considerar un periodo de evaluación de 10 años teniendo en cuenta que un periodo de evaluación menor de 10 años puede ser muy significativo en el cálculo del VAN y la TIR, dado que la inversión que se hace en este tipo de proyectos es muy elevada; y un periodo mayor de 10 años puede influir poco en este cálculo de VAN y TIR

**Tasa de descuento:** Es un factor financiero que normalmente es utilizado para determinar el valor del dinero en el tiempo, y realizar el cálculo del valor actual de un capital futuro. En este caso se consideró un 8 % como la tasa mínima que resulta atractiva para obtener ganancias del capital invertido en este proyecto.

**Impuesto frente a la utilidad neta:** Es el impuesto establecido en cada país con respecto a las utilidades generadas por cada empresa. En el caso de Chile este impuesto corresponde a un 27 % al año 2022.

Los criterios que se consideraron para la estimación de los costos de inversión del proyecto fueron los siguientes:

El costo por equipo se estimó empleando las fórmulas obtenidas del manual Capcosts.

Los costos de adquisición de equipos y materiales principales se obtuvieron a partir de cotizaciones realizadas a empresas, sitios web y actualizaciones de precios de ingenierías de perfil anteriores, para lo cual se utilizó el Marshall & Swift Equipment Cost Index del 2020.

Los costos de equipos menores y materiales relevantes se calcularon en función de porcentajes sobre equipos claves.

Los costos de instrumentación, edificación y montaje consideran el costo de mano de obra, incluyendo salarios, beneficios adicionales y seguridad, materiales consumibles y herramientas de montaje, así como el costo de los equipos que serán usados para la construcción.

A continuación, en la Tabla 28 se presentan los porcentajes de los costos directos asociados a la inversión de cada etapa del proyecto.

**Tabla 28. Factores de estimación del costo físico total de la planta**

Categoría	Factor de estimación por etapa				
	CH %	LIX %	SX %	CR %	Reposición %
Costo de equipos instalados	30	30	30	30	30
Cañerías ( <i>piping</i> )	10	30	30	20	30
Instrumentación	10	10	10	10	10
Edificación	20	50	50	50	50
Auxiliares	25	25	25	25	25

Estos costos se relacionan directamente con los costos de inversión sobre los equipos utilizados. La suma de estas categorías determina el costo total físico de la planta, y sobre este mismo se estiman los costos indirectos de ingeniería y construcción como también los costos de contingencia asociados a omisiones, cambios menores de diseño o situaciones no proyectadas en este estudio.

**Tabla 29. Factores de estimación de costos de ingeniería y contingencias**

Categoría	Factor de estimación (%)
Ingeniería y construcción	35
Contingencia	10

## 4.2. Inversión de la Planta

### 4.2.1. Capital Directo

Los costos de inversión en equipos e implementos necesarios para la puesta en marcha de la planta de sulfato de cobre se describen por área en las siguientes tablas, desde la 30 hasta la 34.

**Tabla 30. Inversión en equipos del área de chancado**

Descripción de equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Triturado de mandíbula	1	19 000	19 000
Chancador secundario	1	98 400	98 400
Harnero vibratorio	1	22 800	22 800
Cintas transportadoras	4	4000	16 000
<b>Total</b>			<b>156 200</b>

**Tabla 31. Inversión en equipos del área de aglomerado y lixiviación**

Descripción de equipos	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Tambor aglomerado	1		24 902	24 902
Cintas transportadoras	2		4000	8000
Membrana HDPE 2 mm	8706	m <sup>2</sup>	6	49 624
Membrana HDPE 1 mm	1229	m <sup>2</sup>	3	3785
Aspersores	55		6	326
Cañería HDPE 110 mm PN6	228	m	11	2576
Bomba peristáltica	2		20 044	40 088
Bomba arrastre magnético	2		2050	4100
<b>Total</b>				<b>133 402</b>

**Tabla 32. Inversión en equipos del área de extracción por solvente**

Descripción de equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Mezclador-decantador sistema completo	2	310 001	620 002
Coalescedor de orgánico cargado	1	38 380	38 380

Post-decantador de refino	1	32 921	32 921
Tanque de orgánico cargado	1	9453	9453
Tanque de orgánico descargado	1	9453	9453
Bomba arrastre magnético	2	3531	7061
Bomba arrastre magnético	2	9680	19 361
<b>Total</b>			<b>736 630</b>

**Tabla 33. Inversión en equipos del área de cristalización y embalaje**

Descripción de equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Mezclador-decantador CR completo	1	277 087	277 087
Bomba arrastre magnético	1	9680	9680
Tanque de electrolito saturado	1	6500	6500
Bomba arrastre magnético	1	2961	2961
Bomba arrastre magnético	1	5694	5694
Bomba de pulpa	1	11 730	11 730
Hidrociclón	1	2961	2961
Post-decantador de orgánico descargado	1	43 839	43 839
Lavador de cristales	2	4214	8428
Centrífuga	1	3417	3417
Tanque de agua de proceso	1	3303	3303
Secador rotatorio	1	6039	6039
Mezclador de sólidos	1	24 637	24 637
Harnero vibratorio	1	3623	3623
Transportador tornillo sinfín	3	2050	6150
Balanza pesaje maxisacos	1	181	181
<b>Total</b>			<b>416 231</b>

**Tabla 34. Inversión en equipos del área administrativa y operativa**

Descripción de equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Tanque de ácido	2	11 503	23 005
Tanque de agua proceso	1	44 530	44 530
Tanque de agua consumo	2	3986	7972
Tanque de extractante	1	342	342
Tanque de diluyente	1	911	911
Tanque de combustible	1	2278	2278

Bomba sumergible	3	1000	3000
Bomba peristáltica	6	14 919	89 514
Bomba peristáltica	1	17425	17 425
<b>Total</b>			<b>188 977</b>

#### 4.2.2. Capital Indirecto

Estos costos se estiman con base en los costos totales de la planta y están asociados a gastos de arriendo de maquinaria, ingeniería y administración. Además, a estos costos indirectos se suman los generados por la sección de imprevistos o contingencias que cubren escenarios omitidos, cambios de programación y cambios menores de diseño. En la Tabla 35 que se muestra a continuación se presentan estos costos para cada etapa de la planta.

**Tabla 35. Estimación de costos indirectos asociados a la inversión**

Categoría	Estimación de costos por etapa				
	CH (USD)	LIX (USD)	SX (USD)	CR (USD)	Reposición (USD)
Ingeniería y construcción	117 267	69 369	720 608	388 239	184 866
Contingencias	33 505	34 684	205 888	110 925	52 819

#### 4.3. Costos Operacionales

##### 4.3.1. Insumos

Los principales insumos asociados al proyecto se mantienen en constante recirculación. A ello se suma el hecho de que los propios factores del proceso o los factores medioambientales terminan consumiéndose gradualmente, lo cual genera un déficit y disminuye la eficiencia del proceso. Los principales insumos de reposición son:

- **Extractante LIX 984N:** Reactivo consumido principalmente por el arrastre de orgánico en las etapas de SX y cristalización.
- **Diluyente ESCAID 103:** Solvente consumido, al igual que el reactivo extractante, por arrastre, además de ser evaporado por los equipos en las etapas de SX y cristalización.

El consumo total de estos reactivos se describe en la siguiente tabla.

**Tabla 36. Consumo mensual de reactivos orgánicos**

Variable	Diseño (l/mes)
Extractante	108.9
Diluyente	411.3

Dado que en el proceso de producción de la planta se generaron 12.78 t/día de sulfato de cobre pentahidratado, el consumo de extractante y diluyente fue respectivamente de 0.284 y 1.073 litros por cada tonelada de cristal de sulfato.

- **Antiaglomerante:** El compuesto seleccionado para este fin es  $\text{NaCO}_3$ , el cual será ingresado al proceso en el equipo mezclador de sólidos a una tasa de 7.67 kg/h. Esta dosificación se determinó según los datos técnicos de proporción que varían entre un 1 % a un 2 %.
- **Ácido sulfúrico:** La dotación de ácido suministrada fue principalmente destinada a la alimentación en los procesos de curado y cristalización del sulfato de cobre, así como en la reposición de este mismo al estanque de refino, tal y como se muestra en la siguiente tabla adjunta.

**Tabla 37. Consumo mensual de ácido sulfúrico en planta**

Área	Diseño (t/mes)
Curado	36.00
Piscina de refino	30.08
Cristalización	144.63
Total	210.71

De acuerdo con lo reportado por estudios de la dirección de estudios y políticas públicas de Cochilco, el ácido sulfúrico cerró el año 2020 con un valor aproximado de USD 69 por tonelada (COCHILCO, 2019). Considerando esta variable constante a lo largo del proyecto de la planta se asumen costos por alrededor de los USD 214 542 anuales en consumo por ácido sulfúrico.

- **Agua industrial:** El agua de los procesos de la planta, almacenada en estanques de PE extra reforzados para un periodo máximo de 3 días, fue extraída mediante bombeo desde un pozo profundo. El consumo de agua de cada etapa de producción se entrega a continuación, en la Tabla 38.

**Tabla 38. Consumo mensual de agua en la planta**

Agua de proceso	Diseño (m <sup>3</sup> /mes)
Aglomerador	448.06
Descarte refino	50.20
Evaporación	850.99
Cristalizador	86.69
Lavador de cristales	46.02
Agua total	1481.97

- **Agua potable:** Las instalaciones de la planta cuentan con agua potable que es suministrada desde pozos certificados por la norma chilena NCH 409/1. Esta agua es utilizada para baños y duchas del personal. El consumo de agua del personal se estimó de acuerdo con los valores entregados por el Servicio Nacional del Consumidor (SERNAC), el cual es aproximadamente de 155 l/día por persona.
- **Energía eléctrica:** El consumo de energía de la planta es en su mayoría trifásico, por lo que se consideró una tarifa de USD 0.38 por cada kWh consumido en el proceso.

**Tabla 39. Consumo de energía eléctrica por área de la planta**

Consumo de energía	Potencia nominal diaria		Consumo estimado	
	kW	HP	kWh/mes	kWh/año
Chancado	838.9	1124.9	25166	301997
Curado y aglomerado	57.1	76.6	1714	20563
Lixiviación	369.6	495.6	11088	133056
Extracción por solvente	235.5	315.9	7066	84793
Cristalización y embalaje	899.0	1205.5	26969	323628
Reposición	34.9	46.9	1048	12580
Administración	19.0	25.5	13680	164160
Total	2454.0	3290.9	86731	1040777

Los costos eléctricos anuales se ven reflejados en la siguiente tabla.

**Tabla 40. Costos del consumo de energía eléctrica por etapa de proceso**

Consumo de energía	Costo (USD/año)
Chancado	44 868
Curado y aglomerado	3055
Lixiviación - alimentación a SX	19 768

Extracción por solvente	12 598
Cristalización y embalaje	48 082
Administración	17 073
<b>Total</b>	<b>145 444</b>

#### 4.3.2. Compra del Mineral

Uno de los gastos más relevantes del proyecto corresponde al valor de compra del mineral, el cual se consideró con base en la media de compra registrada por la empresa ENAMI durante el año 2020. Dicho valor, según se indica en la Figura 4, es de 71.7 USD/TMS.

#### 4.3.3. Mano de Obra Directa

En lo concerniente a la mano de obra de la planta fue necesario implementar dos sistemas de turnos relacionados con las áreas administrativa y de operación. Con relación al área administrativa se efectuaron turnos de 5x2 y jornadas de 9 horas diarias, con 1 hora de colación, en los cargos que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 41. Costos de mano de obra para el área administrativa**

Personal	Dotación	Sueldo (USD/mes)	Alimentación, seguridad y transporte (USD/mes)	Costo (USD/año)
Administrador	1	3000	300	39 600
Supervisor	1	2500	300	33 600
Jefe de mantención	1	1000	300	15 600
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>6500</b>	<b>900</b>	<b>88 800</b>

Para el personal del área de operación se estimaron 2 turnos de 7x7 en jornadas de 12 horas diarias, 1 hora de colación, para los cargos que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 42. Costos de mano de obra para el área de operación**

Personal	Dotación/turno	Dotación total	Sueldo (USD/mes)	Sueldo total (USD/mes)	Alimentación, seguridad y transporte (USD/mes)	Costo (USD/año)
Chofer de camión	1	4	1250	5000	300	63 600
Chofer de cargador frontal	1	2	1250	2500	300	33 600
Operador área CH - LIX	1	4	1250	5000	300	63 600

Operador área SX - CR - secado	2	8	1250	10 000	300	123 600
Bodeguero y vigilancia	1	1	1250	1250	300	18 600
<b>Total</b>		<b>19</b>				<b>303 000</b>

#### 4.3.4. Mantenición

Para el cálculo de los costos de mantenimiento de los equipos se consideró un porcentaje equivalente a un 4 % del valor de los equipos (Silva Carrizo, 2012). El costo de este ítem es de carácter anual y asciende a los 65 258 USD/año.

#### 4.4. Depreciación

La depreciación se imparte de manera lineal sobre todos los equipos adquiridos al cabo de los 10 años estimados del proyecto en estudio, el cual se estima con un valor de 335 854 USD/año.

#### 4.5. Ingresos

Con respecto a la venta de sulfato de cobre pentahidratado se considera el precio de exportación nacional registrado en la última década, y se selecciona el precio reportado en el año 2020 que equivale a 1.73 USD/kg.

**Tabla 43. Valor FOB de sulfato de cobre pentahidratado en la última década**

<b>Año</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
Sulfato de cobre pentahidratado (USD/kg)	2.316	2.116	2.020	2.033	1.778	1.513	1.767	1.947	1.773	1.731

Teniendo en cuenta que durante el desarrollo del presente estudio la producción de sulfato de cobre pentahidratado es de 4.602 ton/año se estima una generación de ingresos totales por 7 961 737 USD/año.

## 4.6. Flujo de Caja

El flujo de efectivo o flujo de caja se elaboró con base en los ingresos y los gastos de una empresa durante un periodo de 10 años de vida útil del proyecto propuesto. Su objetivo es evaluar la liquidez del proyecto y detallar los movimientos de efectivo de la organización, además de contribuir a la identificación de tendencias financieras y a la toma de decisiones de financiamiento y pago de obligaciones.

Un flujo de efectivo positivo indica que los gastos son menores que los ingresos, lo cual es favorable. Por otro lado, un flujo de efectivo negativo indica que los gastos superan los ingresos, lo cual puede ser un indicativo de que el proyecto no es rentable, por lo tanto, en ese caso resulta necesario evaluar si es conveniente continuar o no con el proyecto.

En el caso de este estudio la construcción del flujo de caja se consideró a partir de los ingresos generados por la venta del sulfato de cobre pentahidratado, así como de los costos asociados a la inversión, el costo de compra del mineral, los costos de operación e insumos y los costos del personal necesario para operar en la planta (ver Tabla 44).

**Tabla 44. Flujo de caja calculado para 10 años con valores entregados en USD**

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>Ingresos</b>											
Precio Sulfato de Cobre Pentahidratado (US\$/kg)		1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
Sulfato de Cobre Pentahidratado (ton/año)		4602	4602	4602	4602	4602	4602	4602	4602	4602	4602
<b>Totales</b>		<b>7961737</b>									
<b>Egresos</b>											
Costo plan de cierre (15% de Inversión)											837234
Gastos mano de obra		391800	391800	391800	391800	391800	391800	391800	391800	391800	391800
Mantenimiento		62939	62939	62939	62939	62939	62939	62939	62939	62939	62939
Insumos											
Mineral		5162400	5162400	5162400	5162400	5162400	5162400	5162400	5162400	5162400	5162400
Ácido Sulfúrico		214923	214923	214923	214923	214923	214923	214923	214923	214923	214923
Energía		106933	106933	106933	106933	106933	106933	106933	106933	106933	106933
Extractante		14274	14274	14274	14274	14274	14274	14274	14274	14274	14274
Diluyente		8243	8243	8243	8243	8243	8243	8243	8243	8243	8243
Antiaglomerante		13160	13160	13160	13160	13160	13160	13160	13160	13160	13160
Combustible		69229	69229	69229	69229	69229	69229	69229	69229	69229	69229
<b>Totales</b>		<b>6043903</b>	<b>6881137</b>								
Inversión	5581560										
Capital de trabajo		1495241									1495241
<b>Inversión Total</b>	<b>7076801</b>										
Depreciación		290477	290477	290477	290477	290477	290477	223324	223324	223324	223324
Utilidad antes de Impuestos		1627358	1627358	1627358	1627358	1627358	1627358	1694511	1694511	1694511	857277
Impuestos (27%)		439387	439387	439387	439387	439387	439387	457518	457518	457518	231465
Utilidad después de Impuestos		1187971	1187971	1187971	1187971	1187971	1187971	1236993	1236993	1236993	625812
Depreciación		290477	290477	290477	290477	290477	290477	223324	223324	223324	223324
<b>FLUJO DE CAJA NETO</b>	<b>-7076801</b>	<b>1478448</b>	<b>1478448</b>	<b>1478448</b>	<b>1478448</b>	<b>1478448</b>	<b>1478448</b>	<b>1460317</b>	<b>1460317</b>	<b>1460317</b>	<b>2344377</b>

#### 4.7. Análisis de Sensibilidad

A continuación, el proyecto es sensibilizado en indicadores financieros como el VAN y la TIR para determinar hasta qué punto es factible. Para ello se analizaron tres variables que influyen significativamente en el flujo de caja del proyecto, estas son:

- Ley de mineral a procesar
- Valor de compra de mineral
- Precio de venta del sulfato de cobre pentahidratado

En las siguientes tablas se presenta cómo fluctúan estos indicadores a cambios en las variables ya descritas.

**Tabla 45. Cambios en indicadores financieros en función del precio FOB de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$**

Precio del sulfato (USD/kg)	Indicadores	
	VAN (USD)	TIR (%)
2.0	9301972	31.8
1.9	7047669	26.5
1.8	4793365	20.9
1.7	2539062	15.1
1.6	284758	8.8
1.5	-1969545	1.8
1.4	-4223849	-6.5
1.3	-6478152	-17.8

**Tabla 46. Cambios en indicadores financieros en función de ley de cobre en mineral**

Ley de venta (%)	Indicadores	
	VAN (USD)	TIR (%)
1.9	7795312	28.3
1.8	5505338	22.7
1.7	3215353	16.9
1.6	925379	10.7
1.5	-1364595	3.8
1.4	-3654569	-4.3
1.3	-5944543	-14.7

**Tabla 47. Cambios en indicadores financieros en función del precio de compra del mineral**

Precio del mineral (USD/t)	Indicadores	
	VAN (USD)	TIR (%)
90	-3415550	-2.5
85	-1603828	3.3
80	207894	8.6
75	2019616	13.7
70	3831338	18.6
65	5643060	23.4
60	7454782	28.1

De los datos anteriores, realizando en cada caso una interpolación lineal, se puede destacar que el proyecto es rentable para valores superiores a los 1.6 USD/kg en ventas de sulfato cobre pentahidratado. para leyes sobre 1.56 % de cobre soluble y para valores de compra de mineral iguales o inferiores a 80.6 USD/t.

## 5. CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Esta memoria se propuso determinar técnica y económicamente la viabilidad y rentabilidad de establecer una planta de beneficio para la obtención de sales de cobre en una empresa de la pequeña minería. A partir de los antecedentes bibliográficos citados para la proyección del presente estudio se determinó el importante impacto y beneficio que se obtiene a través de la producción de sales de cobre, más concretamente el sulfato de cobre pentahidratado. en el mercado de la pequeña minería o minería artesanal.

Es de resaltar que en todo momento se deben mantener controlados los niveles de ácido sulfúrico, mineral para trabajar y ley de este. Asimismo, es importante asumir el control de las impurezas en cada área como lo son el  $\text{Fe}^{3+}$  o los arrastres producidos en el área de extracción y cristalización. Por otro lado. se debe destacar la importancia de garantizar la seguridad durante la puesta en marcha y operación de la planta de producción de sulfato de cobre pentahidratado; y considerar que. debido a que se manipulan soluciones ácidas. es primordial contar con el equipo de protección personal adecuado y tener un conocimiento completo sobre la manipulación de este tipo de soluciones.

A partir de la evaluación económica realizada se obtuvo una TIR del 17 % y un VAN de USD 3.2 millones, lo que permite deducir que el proyecto analizado es inicialmente rentable. Por consiguiente. es beneficioso para las pequeñas empresas mineras chilenas considerar la posibilidad de abrir sus fronteras a la producción de sulfato de cobre pentahidratado.

Por último, cabe mencionar que la variable que más impacta de las tres estudiadas en el análisis de sensibilidad es la ley de cobre presente en el mineral que ingresa al proceso, por lo que se deberá realizar constantemente un análisis químico del mineral que ingrese al proceso productivo. dado que ello impactará de manera importante en la rentabilidad del proyecto.

## **5.2. Recomendaciones**

Al considerarse un estudio teórico, el estudio económico puede sufrir variaciones debido a procedencia de los equipos comprados por parte de la empresa, así como la ubicación de la planta de beneficios. Además, el estudio se realizó considerando que la misma empresa compra su propio mineral lo que abre la posibilidad que pueda comprar el mineral de otros pequeños productores para cumplir con la cuota de abastecimiento de mineral.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Bocanegra, R. M. (2021). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta productora de tubos de cobre flexible revestidos con PVC [tesis de grado, Universidad de Lima]*. Repositorio Institucional ULima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12724/14350>
- Chaparro, E. (2000). *La llamada pequeña minería: un renovado enfoque empresarial*. CEPAL - Serie Recursos naturales e infraestructura.
- COCHILCO. (2019). *Mercado chileno del ácido sulfúrico al año 2028*.
- COCHILCO. (2022). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2002-2021*.
- Codelco Chile. (2018). *¿Qué es el cobre?* Obtenido de [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/que\\_es\\_cobre.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/que_es_cobre.html)
- Comisión Chilena del Cobre. (2014). *Monitoreo de la mediana y pequeña minería chilena*. Ministerio de Minería.
- Del Campo Arias, A. (2021). *Desafíos para la pequeña minería*. Videoconferencia.
- Gahona Gallardo, C. (2011). *Extracción por solvente de cobre mediante líquido iónico*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de ingeniería, Valparaíso.
- Gahona, C. (2011). *Extracción por solvente de cobre mediante un líquido iónico [tesis de grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]*. Repositorio Institucional PUCV. Obtenido de <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/91333>
- Juárez, W. (2010). *Producción de Sulfato de Cobre Pentahidratado en*.
- Ley 18248 [Ministerio de Minería]. Código de Minería. 14 de octubre de 1983. (s.f.). Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29668>
- Meller, P., & Meller, A. (2021). *La Empresa Nacional de Minería (ENAMI) de Chile. Modelo y buenas prácticas para promover la sostenibilidad de la minería pequeña y artesanal en la región andina*. Naciones Unidas.
- Melo, D., & Ochoa, N. (2021). *Diagnóstico del proceso de cristalización del sulfato de cobre pentahidratado mediante revisión bibliográfica [tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]*. Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8321>
- Morales, F. (2015). *Diseño de una planta de cristalización para producir sulfato de cobre pentahidratado como alternativa para la pequeña y mediana minería de la región sur - Perú [tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]*. Repositorio UNSA. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/179>

Ondarse, D. (15 de julio de 2021). *Cristalización*. Obtenido de Concepto de:

<https://concepto.de/cristalizacion/>

Quimica Industrial Chile. (2020). *quimicaindustrialchile.cl*. Obtenido de

<https://quimicaindustrialchile.cl/producto/sulfato-de-cobre-pentahidratado/>

Silva Carrizo, J. (2012). *OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DERIVADOS DE COBRE A PARTIR DE SOLUCIONES DE DRENAJES ÁCIDOS DE BOTADERO Y SOLUCIONES FERROSAS DESDE SUPERINTENDENCIA DE PLANTA DE PRODUCTOS COMERCIALES*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, FACULTAD DE INGENIERÍA, VALPARAÍSO.

Tabilo, F. I. (2012). *Proyecto Anico [tesis de pregrado, Universidad de Chile]*. Repositorio

UChile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112536>

Veritrade. (2015). *veritradecorp.com*. Obtenido de

<https://www.veritradecorp.com/es/chile/importaciones-y-exportaciones/de-cobre/283325>

Viera, M. (26 de marzo de 2015). *La pequeña minería, un eterno prospecto de exploración*

*minera*. Obtenido de

<https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=96749711>

Zinsa. (2016). *Sulfato de Cobre*. Obtenido de <https://www.zinsa.com/es/derivados-de-cobre/sulfato-de-cobre>

## 7. ANEXOS

Sistema de bombeo total fue previsto tomando en consideración los siguientes flujos:

- Riego a pilas de lixiviación
- Refino desde la planta SX hasta la piscina.
- PLS desde la lixiviación hasta la planta SX.
- Solución ácida de reposición a estanque de refino.
- Solución ácida para curado y aglomerado de mineral.
- Solución ácida de reposición a estanque de refino.
- Solución ácida desde postdecantador de refino.
- Agua de reposición a estanque de refino.
- Agua para curado y aglomerado de mineral.
- Solución orgánica a SX
- Solución de recirculación en SX
- Pulpa desde cristalizador

En las siguientes tablas se pueden apreciar los requerimientos para el sistema de bombeo de las soluciones.

**Tabla 48. Bomba peristáltica para soluciones ácidas**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal máximo	145	L/H
Potencia	0.18	kW
Velocidad	100	rpm
Presión máxima	750	kpa
No. De unidades	7	

**Tabla 49. Bomba centrífuga de agua fresca**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal máximo	42.0	m <sup>3</sup> /h
Potencia	4.0	HP
Altura máxima	21.0	m
No. De unidades	2	

**Tabla 50. Bomba centrífuga de Pulpa**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal máximo	12	m <sup>3</sup> /h
Potencia	15	kW
Velocidad	1800	rpm
No. De unidades	1	

**Tabla 51. Bomba de arrastre magnético**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal máximo	27	m <sup>3</sup> /h
Potencia	4	kW
Altura máxima	24	m
No. De unidades	2	

**Tabla 52. Bomba de arrastre magnético**

Variable	Diseño	Unidad
Caudal máximo	2.7	m <sup>3</sup> /h
Potencia	0.25	kW
Altura máxima	8	m
No. De unidades	2	

**Figura 11. Ficha técnica del sulfato de cobre pentahidratado**

ORIGEN		
<p>El sulfato de cobre es obtenido solo a partir de minerales oxidados, asegurando un producto de alta calidad libre de elementos contaminantes indeseados como dioxinas y furanos.</p> <p>El sulfato de cobre pentahidratado de Minera Diamantino tiene características especiales por su pureza química, se encuentra libre de metales pesados, es un micro cristal homogéneo, con una humedad y granulometría estable, las propiedades sensoriales son:</p>		
Tacto	Micro Cristales	
Color	Celeste Claro	
Olor	Inodoro	
Aspecto	Tipo Nieve	
COMPOSICION CUANTITATIVA		
Nombre Técnico		Sulfato de Cobre Pentahidratado
Formula Química		$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Numero de Cas		7758-99-8
Sulfato de Cobre Pentahidratado		94,50 %+-2%
Cobre		24.0 +- 0.5 %
Humedad		3,50 +-0,5%
pH	Min	2,00
Acido Libre (Ácido Sulfúrico)	Max	1,00
Insoluble en Agua	Max	0,05 %
EMPAQUE		
<p>El producto se presenta en tres tipos de envases:</p> <p>1- Maxi Bag de 1 o 1,25 Ton con bolsa interior.</p> <p>2- Saco impermeable de Polipropileno laminado o saco de Polipropileno laminado con bolsa interior con capacidad de 25 Kg o 50 Lb.</p> <p>Ambos tipos de envases son empacados sobre pallets de madera tratados térmicamente para cumplir con normas fitosanitarias, para exportaciones.</p>		
ALMACENAJE		
<p>Almacenar en un lugar seco, y manteniendo una humedad controlada, lo cual ampliara el tiempo de vida útil. Producto Altamente Higroscópico.</p>		
USOS		
<p>El sulfato de cobre pentahidratado de grado técnico es un producto elaborado para uso principal como fungicida y bactericida de amplio espectro, uso en aplicaciones mineras y en tratamiento de aguas, desinfección y otros.</p>		
RECOMENDACIONES		
<p>Mantenga el envase cerrado. Si por alguna razón el envase es abierto durante su almacenaje, consumir inmediatamente ya que el producto es higroscópico y sus propiedades Físico-Químicas se verán alteradas.</p>		
PRECAUCIONES A TOMAR		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leer hoja de seguridad antes de usar.</li> <li>• No usar en recipiente de hierro por su poder corrosivo si hay humedad.</li> <li>• Mantener en lugar seco.</li> <li>• Evitar contacto con los ojos y piel: especialmente vías respiratorias.</li> <li>• Evitar contacto con ropas.</li> <li>• Almacenar en envase original cerrado, en lugar fresco y seco.</li> <li>• Una vez abierto consumir inmediatamente, para evitar su aglomeración a causa de la humedad ambiente.</li> </ul>		

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

**Título: Evaluación técnica y económica de la factibilidad de producir sales de cobre en una planta de la pequeña minería**

**Nombre Memorista:** Manuel Alejandro Muñoz González

<b>Modalidad</b>		<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>  <b>Prof. Fernando Parada Luna</b>
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>	<b>28.03.2024</b>	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Ingeniero Supervisor:</b>
		<b>Institución:</b> Universidad de Concepción

**Comisión (Nombre y Firma)**

Prof. Eduardo Balladares Varela	Prof. Rodrigo Yepsen Ferreira
---------------------------------	-------------------------------

**Resumen**

Durante las últimas décadas la minería a dados pasos agigantados en la innovación de extracción y producción de metales como hierro, aluminio, cobre, plata y oro, entre otros. En nuestro caso particular, el cobre ha permitido a Chile posicionarse como uno de los países con mayor potencial en el mercado mundial, lo que favorece enormemente el crecimiento económico de nuestro país.

Dentro del territorio nacional la practica minera ha generado muchísimo capital de trabajo y empleabilidad reflejada en un abrupto crecimiento económico y cultural en localidades con condiciones climáticas inhóspitas.

La pequeña minería y minería artesanal, contrario a las medianas y grandes empresas, y debido a sus métodos de explotación, siempre se encuentran expuestas frente a variaciones en el mercado, lo que se refleja en los precios ofrecidos por su demanda o en la sobre oferta de productos. Frente a este escenario algunas pequeñas mineras se ven en la obligación de responder mediante el cierre de sus operaciones y la reducción de inversiones.

En esta memoria se desarrolló un estudio técnico y de mercado que avalan los beneficios económicos de obtener sales de cobre a partir de óxidos de cobre, tomando en cuenta todos los aspectos a considerar en el proceso productivo.

La planta de beneficio descrita consta de 4 etapas fundamentales las cuales trabajan con una dotación de mineral aproximada de 200 toneladas diarias y una ley en mineral de 1.7%. La sal producida en el estudio fue el sulfato de cobre pentahidratado la que posee un amplio mercado y una alta demanda, especialmente en el sector agrícola.

La producción diaria de sulfato de cobre pentahidratado se estima en 12.78 tpd que refleja un beneficio económico de USD 22.109 por día.

La evaluación económica asociada al estudio arrojó una inversión inicial de USD 5.581.560, un capital de trabajo de USD 1.504.869 y costos de operación USD 6.082.414 anual. El VAN presentado en el estudio, al cabo de 10 años, es de USD 3.021.542 y una TIR de 16%.