UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Técnico Universitario de acceso ABIERTO

2022

RECUPERACION DE Cu+2 EN RELAVE DE FLOTACION CON ZEOLITA, EN LABORATORIO DE METALURGIA DE UTFSM, SEDE VIÑA DEL MAR

PERALTA FERNANDEZ, CAMILA ANDREA

https://hdl.handle.net/11673/53228

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

RECUPERACIÓN DE Cu^{+2} EN RELAVE DE FLOTACIÓN CON ZEOLITA, EN LABORATORIO DE METALURGIA DE UTFSM, SEDE VIÑA DEL MAR

Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en MINERÍA Y METALURGIA

Alumnas:
Camila Andrea Peralta Fernández
Claudia Dariela Venegas Julve

Profesor Guía:
Luis Gutiérrez Meneses

2022

RESUMEN

KEYWORDS: RELAVE, ZEOLITA, ANALISIS QUIMICO

En minería los procesos de flotación dejan grandes cantidades de relaves que se han ido acumulando a través del tiempo, ya que son pocas y recientes las técnicas de tratamiento para estos. Estos tratamientos están enfocados en recuperar porcentajes de Cu, que quedan en los relaves, para así aumentar la ley que, debido a la escasez del recurso, está cada año más baja.

El presente trabajo de título apunta a establecer un procedimiento de laboratorio que permita estudiar la recuperación de Cu, desde relaves de flotación con zeolita clinoptilolita y su capacidad de absorción a través de intercambio iónico, procedimiento que lidia con la problemática planteada.

El primer capítulo describe los actuales procesos de recuperación de cobre, realizándose una investigación bibliográfica de estos, continua con intercambio iónico, proceso fundamental en nuestro trabajo, esta propiedad la posee nuestra zeolita, que también se describe en este capítulo. Se describen los depósitos de relaves y el porcentaje de cobre en ellos, finalizando con los parámetros y variables necesarias para la recuperación de cobre con zeolita.

En el capítulo dos se define en detalle la preparación experimental, cada uno de los pasos que tuvimos que llevar a cabo, para realizar este procedimiento de recuperación de cobre con zeolita, por ejemplo, el roleo y cuarteo de la muestra de relave, el acondicionamiento previo para la zeolita, el cual es fundamental para la activación de su propiedad de intercambio iónico. Finalizando con los materiales utilizados y el procedimiento ordenado.

En cuanto al tercer capítulo, se realiza una descripción bibliográfica de análisis químico y en específico a los dos utilizados, espectrometría de rayos x y absorción atómica, continuando con la evaluación y resultados del procedimiento, los costos y una proyección en caso de ser implementado, en las experiencias de laboratorio de la carrera.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES 3

1. FORMAS DE RECUPERACIÓN DE Cu 4

1.1 PROCESOS METALÚRGICOS 4

1.1.1 Procesamiento general de la hidrometalurgia 4

1.1.2 Procesamiento general de la pirometalurgia 5

1.2 INTERCAMBIO IÓNICO 5

1.2.1 Intercambio iónico con la zeolita 6

1.3 ZEOLITA 6

1.3.1. Zeolita clinoptilolita 7

1.1.3.2 Usos de la zeolita Clinoptilolita 8

1.3.2. Estudios realizados con zeolita 8

1.4 DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE 9

1.4.1. El cobre en los relaves 10

1.4.2 Ley de cobre 10

1.5. PARÁMETROS Y VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL Cu^{+2} 11

1.5.1. Tamaño de partículas (granulometría) 11

1.5.2. Agitación 12

1.5.3. Temperatura 12

1.5.4. pH 13

1.5.5. Concentración 14

1.5.5.1. Medidas de concentración química 14

1.5.5.2. Unidades físicas de concentración de soluciones 14

1.5.5.3. Unidades químicas de concentración de soluciones 15

CAPÍTULO 2: 17

PREPARACIÓN EXPERIMENTAL 17

2. PREPARACIÓN EXPERIMENTAL 18

2.1. FORMAS DE RECUPERACIÓN DE METALES EN RELAVES 18

2.1.1. Método por Flotación 18

2.1.2. Método por Lixiviación 19

2.2. PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL 19

2.3. EQUIPO EXPERIMENTAL 20

2.4. ROLEO Y CUARTEO 20

2.5. TAMIZADO 21

2.6. PREPARACIÓN DE LA ZEOLITA 21
2.6.1. Granulometría de la zeolita 22
2.6.2. Acondicionamiento de la Zeolita 23
2.6.3 Preparación de las soluciones de relave 26
2.7. EJECUCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 27
2.7.1. Procedimiento experimental 27
CAPÍTULO 3: 29
EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO, INSUMOS Y COSTOS DE APLICACIÓN 29
3.1. ANÁLISIS QUÍMICOS 30
3.1.1. Clasificación de los Métodos de Análisis 30
3.1.2.1 Espectrometría de rayos X 32
3.1.2 Tipo de análisis empleado 33
3.1.2.2 Absorción atómica. 33
3.2. EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS 34
3.3. CUADRO COMPARATIVO Y COSTOS 36
3.4. PROYECCIÓN EN LABORATORIO DE LA CARRERA 38
3.4.1. Prototipo de experiencia en laboratorio 40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 43
BIBLIOGRAFÍA 45
ANEXOS 46

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1-1. Diagrama del proceso Hidrometalúrgico 5

Figura 1-2. Representación artística de la estructura porosa de las zeolitas 8

Figura 1-3. Agitador Magnético 12

Figura 1-4. Escala de pH 13

Figura 2-1. Técnica de monitoreo hidráulica en relave. 19

Figura 2-2. Secuencia de cuarteo 21

Figura 2-3. Muestra de zeolita en vidrio reloj 23

Figura 2-4. Muestras de zeolita filtrándose en matraz Erlenmeyer 24

Figura 2-5. Papel filtro en desecador 25

Figura 2-6. Zeolita sódica final en mortero. 25

Figura 2-7. Se muestran las 3 soluciones diferentes con las cantidades de relave y zeolita correspondiente 26

Figura 3-1. Esquema de gravimetría por precipitación 31

Figura 3-2. Metodología de análisis volumétrico 31

Figura 3-3. Cromatografía en columna 32

Figura 3-4. Esquema Espectrometría de Rayos X 33

Figura 3-5. Esquema de absorción atómica 34

Figura 3-6. Zeolita Viva Vida 180g 37

Figura 3-7. Zeolita Aldea Nativa 180g 37

Figura 3-8. Zeolita Emporio verde 180g 38

Figura 1 Vaso Precipitado 47

Figura 2 Vidrio Reloj 47

Figura 3 Matraz Erlenmeyer 47

Figura 4 Embudo Buchner 48

Figura 5 Papel Filtro 48

Figura 6 Cloruro de sodio 49

Figura 8 Bomba de vacío 49

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1-1 Principales zeolitas naturales y los elementos que la componen. 7

Tabla 1-2 Ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile, por tipo de proceso. 11

Tabla 2-1 Tamizaje de la zeolita. 23

Tabla 3-1 Cantidad de cobre presente en la muestra completa de relave. 35

Tabla 3-2 Resultados de análisis de absorción atómica. 35

Tabla 3-3 Comparación de 3 precios de zeolita en el comercio. 37

Tabla 3-4 Resumen de costos. 38

Tabla 3-5 Cuadro resumen distribución de paralelos. 39

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1 Recuperación de cobre en función del tamaño de las partículas de zeolita, según estudios realizados en el año 2011. 22

Gráfico 3-1 Porcentaje de cobre contenido en la solución de Zeolita v/s los g de relave por muestra. 36

Gráfico 3-2 Porcentaje de cobre en las muestras de relave, comparado Con el porcentaje de cobre en la zeolita post análisis químico. 36

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLA

Al: Aluminio

As: Arsénico

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

Ca: Calcio

Cd: Cadmio

Co: Cobalto

Cochilco: Comisión Chilena del Cobre

Cu^{+2}: Cobre (II)

EW: Electro Winning

Fe: Hierro

Hg: Mercurio

H: Hidrógeno

LX: Lixiviación

Mg: Manganeso

Mn: Magnesio

Na: Sodio

Ni: Níquel

ppm: Partículas por millón

Pb: Plomo

pH: Potencial de Hidrógeno

PLS: Solución de lixiviación cargada

PUCV: Pontificio Universidad Católica de Valparaíso

RAE: Real Academia Española

RPM: Revoluciones por Minuto

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

Si: Silicio

SX: Extracción por Solventes

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María

Zn: Zinc

B. SIMBOLOGÍA

g: Gramos

Kg: Kilogramos

L: Litro

mg: Miligramo

mL: Militros

mm: milímetros

m: molalidad

M: Molaridad

µM: Micrómetro

#: Malla de Tamiz

%: Porcentaje

°C: Grados Celsius

K: Grados Kelvin

INTRODUCCIÓN

Como sabemos el cobre es el mayor mineral de exportación en Chile, por lo tanto, mientras más eficientes sean sus procesos de extracción y menor porcentaje de cobre quede en los desechos, aumentaría su producción y disminuirían los porcentajes de pérdida del mineral, pero siempre existe un porcentaje bajo de mineral de interés que no se logra procesar y en conjunto con los desechos tóxicos, se depositan en un relave minero.

Un relave corresponde a un conjunto de desechos tóxicos, que quedan como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. Usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga, (o sin valor comercial), aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados, tales como, cobre, plomo, mercurio y metaloides como el arsénico. Asimismo, contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en tranques o depósitos de relaves, donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada mayoritariamente, y otra parte se evapora. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

De acuerdo con la última actualización de "Catastro Nacional de depósitos de Relaves" realizados, el 2021 por el Servicio Nacional De Geología y Minería (Sernageomin), registraron 757 depósitos identificados, con 112 activos, 467 no activos, 173 abandonados y 5 en construcción. [1]

Por lo expuesto anteriormente, se quiere desarrollar la recuperación de Cu^{+2} en relave, con zeolita**.** La zeolita es un mineral volcánico natural**,** que presenta una estructura microporosa, que le confiere propiedades adsorbentes y una capacidad de intercambio catiónico, debido a un desequilibrio de cargas que es función de la relación Si y Al que posee.

Según estudios a escala de laboratorio, indican la remoción de metales pesados (Cu, Zn, Cd, Ni, Mn, Fe), por combinación de procesos de precipitación-neutralización, con Intercambio Iónico con clinoptilolita natural sódica, de desagües ácidos de minas. Los resultados demuestran como la eliminación de los metales se verifica fundamentalmente por intercambio (I.I) de los iones Na^{+}. A modo general, la remoción de estos metales pesados es lenta, pero efectiva, presentándose los mejores resultados para el Cu, Zn y Cd con un 99,91% y para el Mn 60 %. [2]

En este trabajo se plantea recuperar el cobre de un relave de flotación, porque una recuperación de este metal en la industria trae consigo beneficios para el entorno, como: reducir la superficie que ocupa, permite re-depositar los relaves de acuerdo con las nuevas normativas medioambientales, pues muchos fueron construidos cuando éstas no existían. Pueden facilitar los procesos de cierre de faenas y disminuir costos, incluso aportando recursos a partir de los valores que se pueden recuperar.

Otra de las razones importante es la baja de mineral, que se viene arrastrando hace años, según información de Codelco tiene proyectos de hasta 0,2% ley de corte, de la última actualización de Cochilco, da como resultado una ley promedio de 0,67%, año 2019, entre las principales empresas mineras del país [3]. En base a su producción del año anteriormente mencionado.

Dado a la baja en la ley de cobre, que irá disminuyendo cada año, se hace relevante e interesante la propuesta de buscar como rescatar el cobre, que queda en los relaves.

OBJETIVO GENERAL

Recuperar Cu^{+2} a partir de una muestra patrón de relave, por medio de intercambio iónico con zeolita Clinoptilolita, estableciendo las condiciones técnicas y económicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Reconocer la importancia de la zeolita en la recuperación de los minerales de cobre, estableciendo las condiciones susceptibles en laboratorio.

II. Elaborar un procedimiento de trabajo con la zeolita y el intercambio iónico para la recuperación del Cu^{+2}, determinando las condiciones en laboratorio.

III. Evaluar el procedimiento para la recuperación del Cu^{+2} con zeolita, de acuerdo con el análisis químico, estableciendo los insumos y costos para su aplicación.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. FORMAS DE RECUPERACIÓN DE Cu

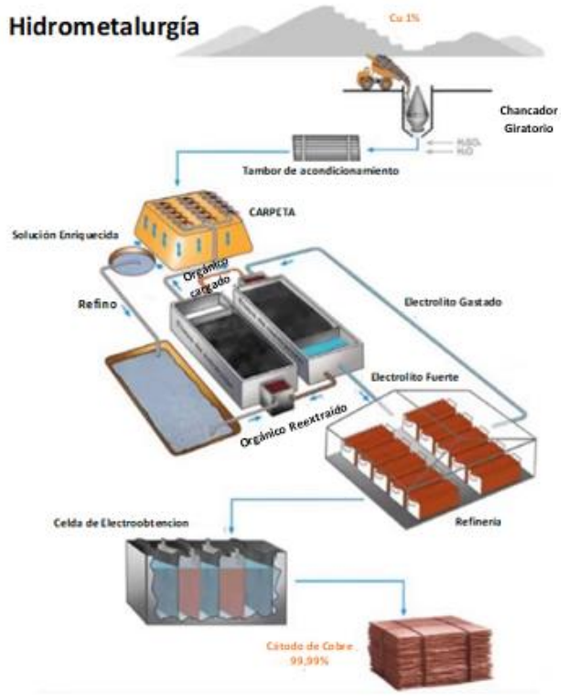
Cuando nos referimos a formas de recuperación de cobre, hablamos de los procesos metalúrgicos que se deben llevar a cabo, para obtener este mineral. A continuación, se describen los dos más utilizados.

1.1 PROCESOS METALÚRGICOS

Actualmente se distinguen dos procesos metalúrgicos para obtener el mineral de cobre, por una parte, tenemos la hidrometalurgia y por otro lado la pirometalurgia.

1.1.1 Procesamiento general de la hidrometalurgia

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia, que cubre la extracción de metales empleando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. Se aplica de forma mayoritaria a los óxidos de cobre, mediante el uso de pilas o bateas para lixiviación. Se basa en la concentración de soluciones lixiviantes, que reaccionan con los metales presentes en el mineral y las convierten en iones que podrían ser reversibles y poseer diferentes características físicas y químicas, las soluciones procedentes de las operaciones de lixiviación, toman el nombre de PLS, esta solución puede pasar a un proceso de extracción por solventes, en el cual se utiliza una solución orgánica para cargar y descargar el electrolito, aumentando el contenido de cobre en la solución para luego pasar a la etapa de electroobtención, del cual se obtienen cátodos de alta pureza. [4] Ver figura 1-1.



Fuente: Gecamin, (2017). Hidrometalurgia: soluciones tecnológicas limpias y eficientes. Hydroprocess.

Figura 1-1. Diagrama del proceso Hidrometalúrgico

1.1.2 Procesamiento general de la pirometalurgia

La pirometalurgia es la rama de la metalurgia, que se aplica de forma mayoritaria a los sulfuros de cobre, centrada en obtener y refinar los metales a través del calor, este proceso parte con el chancado, luego la molienda, con el fin de reducir la granulometría del mineral, posteriormente se realiza la etapa de flotación, que busca separar el mineral de la ganga y concentrar la mayor cantidad de cobre. El proceso de fundición es la etapa que sigue, en el cual, mediante proceso de fusión y conversión, se concentra el metal a recuperar, mediante una separación de fases de alta temperatura, para obtener ánodos de cobre, relativamente de un 96% de pureza. Como última etapa viene el proceso de electrorefinación que es la disolución electroquímica en los ánodos impuros de cobre, para permitir que el metal se deposite en forma selectiva y con máxima pureza, sobre cátodos de cobre alcanzando un 99,99% de pureza. [5]

1.2 INTERCAMBIO IÓNICO

Unos de los aspectos más relevantes para desarrollar este trabajo es el Intercambio Iónico. El intercambio iónico es un intercambio de iones entre dos electrolitos

o entre una disolución de electrolitos y un complejo. En la mayoría de los casos, se utiliza el término para referirse a proceso de purificación, separación y descontaminación de disoluciones, que contienen dichos iones, empleando para ello sólidos poliméricos o minerales dentro de dispositivos llamados intercambiadores de iones.

Los intercambiadores de iones suelen contener resinas de intercambio iónico, (porosas o en forma de gel) en esta experiencia la zeolita de comporta como la resina.

El intercambio iónico puede explicarse como una reacción reversible implicando cantidades químicamente equivalentes.

Un ejemplo común de intercambio iónico es en los filtros de agua para producir agua blanda. Esto se logra mediante el intercambio de cationes calcio Ca^{+2} y magnesio Mg^{+2} por Na^{+1} o H^{+}.

1.2.1 Intercambio iónico con la zeolita

En el caso de la zeolita el intercambio iónico ocurre por átomos de aluminio, que producen una carga neta negativa en la estructura, que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí se considera su propiedad intrínseca, producto de la sustitución de los átomos de silicio de su estructura cristalina, por otros átomos. Debido a su estructura cristalina microporosa, de las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian, determinan el curso del proceso.

El comportamiento de Intercambio iónico en las zeolitas depende de varios factores que determinan una mayor selectividad en las zeolitas a determinados cationes:

- Naturaleza de los cationes en solución
- Temperatura
- Concentración de los cationes en solución
- Aniones asociados con los cationes en solución
- Solvente – agua, solvente orgánico
- Estructura de la zeolita

1.3 ZEOLITA

La zeolita es un mineral de origen volcánico natural, que se forma cuando los volcanes entran en erupción, la lava fundida y la ceniza volcánica entra en contacto con el océano y terminan desembocando en el mar. Se produce una reacción química por el choque entre el líquido caliente y la sal del mar, se forman las zeolitas en la lava, endurecida con el paso del tiempo.

Las zeolitas naturales presentan como características relevantes, una estructura microporosa, que le confiere propiedades adsorbentes y una capacidad de intercambio catiónico, debido a un desequilibrio de cargas que es función de la relación Si y Al que contiene.

Existen cerca de 40 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo, tan solo algunas especies, son ampliamente utilizadas (Jiexiang Y Surent, 1993). Dentro de esas se incluyen: mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, eroinita y chabazita.

Las zeolitas pertenecen a los tectosilicatos, que conforman cerca del 75% de la corteza terrestre. [6]

Tabla 1-1 Principales zeolitas naturales y los elementos que la componen.

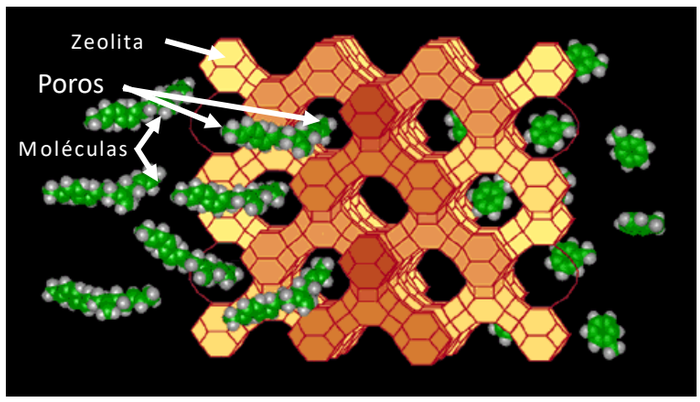
Zeolitas	Formula Química
Laumontita	$Ca\ Al_2\ Si_4\ O_{12} \cdot 4\ H_2O$
Clinoptilolita	$(Na,K,Ca)_{2\text{-}3}\ Al_3\ (Al,Si)_2\ Si_{13}\ O_{36} \cdot 12\ H_2O$
Stilbita	$Na\ Ca_2\ Al_5\ Si_{13}\ O_{36} \cdot 14\ H_2\ O$
Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1\text{-}2}\ (Si,Al)_8 \cdot O_{16} \cdot 6H_2O$
Erionita	$(K_2,Ca,Na_2)_2\ Al_4\ Si_{14}\ O_{36} \cdot 15H_2O$
Offretita	$(K_2,Ca)_5\ Al_{10}\ Si_{26}\ O_{72} \cdot 30H_2O$
Faujazita	$(K_2,Ca)\ Al_2\ Si_4\ O_{12} \cdot 8H_2O$
Chabasita	$Ca\ Al_2\ Si_4\ O_{12} \cdot 6H_2O$
Natrolita	$Na_2\ Al_2\ Si_3\ O_{10} \cdot 2H_2O$
Thomsonita	$Na\ Ca_2\ Al_5\ Si_5\ O_{20} \cdot 6H_2O$
Mordenita	$(Ca,\ Na_2,\ K_2)\ Al_2\ Si_{10}\ O_{24} \cdot 7H_2O$
Epistilbita	$Ca\ Al_2\ Si_6\ O_{16} \cdot 5H_2O$
Analcima	$Na\ Al\ Si_2\ O_6 \cdot H_2O$
Heulandita	$(Na,\ Ca)_{2\text{-}3}\ Al_3\ (Al,\ Si)_2\ Si_{13}\ O_{36} \cdot 12H_2O$

Fuente: Curi, A., Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la descontaminación de efluentes Mineros. Información tecnológica, 17(6), 111-118.

1.3.1. Zeolita clinoptilolita

De las 40 especies existentes de minerales zeolíticos, la clinoptilolita, es la más abundante en suelos y sedimentos. La clinoptilolita, es el mineral zeolítico de la familia de la heulandita. Estos tipos de minerales tienen una estructura porosos y se encuentran en los suelos ácidos débiles y alcalinos fuertes (Ming y Dixon, 1987). La composición química de la serie heulandita-clinoptilolita, se caracteriza por los cambios en la relación Si/Al, así como también por la composición de los cationes intercambiables.

La estructura de la zeolita tiene forma de paneles de abeja y posee una carga negativa, por ello cuando se produce una reacción química, todos los metales pesados (mercurio, plomo, cobre, cadmio, arsénico, etc), poseen carga positiva, siendo atraídos y quedando atrapados en la estructura molecular de la zeolita. Ver Figura 1-2.



Fuente: Andes S.P.A, (2018). Zeolita Clinoptilolita: estructura de las zeolitas.

Figura 1-2. Representación artística de la estructura porosa de las zeolitas.

1.1.3.2 Usos de la zeolita Clinoptilolita

Debido a la intoxicación por metales, o minerales, el monóxido de carbono del medio ambiente, pesticidas que vienen en los alimentos y otros agentes químicos usados en el hogar o en el trabajo afectan de forma generalizada al medioambiente, ríos, océanos, y todas las entidades que viven y habitan la Tierra. Por ello la zeolita y su poder quelante, es utilizado en muchos ámbitos. Es muy usada a nivel industrial, para purificación de agua y aire, como depurador en la industria alimentaria, para fertilización agrícola y como suplemento mineral en nutrición animal, y beneficios y propiedades de desintoxicación, tanto para humanos como para animales.

1.3.2. Estudios realizados con zeolita

Existen diversos estudios realizados con intercambio iónico con zeolita, pero ninguno de estos está relacionado con la recuperación de cobre, en algún relave. A continuación, se mencionarán algunos de estos estudios.

Uno de los estudios que sirvió como guía, es el realizado por la Universidad de la Habana en Cuba en donde demostraron la utilización de zeolitas naturales, fundamentalmente la Clinoptilolita, como una práctica importante en el control ambiental de residuales industriales, fundamentalmente en la eliminación de metales tóxicos. [7]

Otro estudio realizado por Adilson Curi, Wilmer J. V. Granda, Hernani M. Lima y Wilson T. Sousa en la Universidad Federal de Ouro Pret en Brasil, usaron las zeolitas naturales en el tratamiento de efluentes, conteniendo metales pesados, ellos pudieron indicar que las zeolitas naturales son eficientes en la remoción de metales pesados (Pb, Cu, Ni, As, Cd, Hg, Zn), en efluentes mineros metalúrgicos; también que en las actividades mineras informales, las zeolitas se emplean en la descontaminación del mercurio y sirven para la absorción de vapores de mercurio en hornos de copelas, quemadores de amalgama.[6]

En Colombia Arnoldy Estupiñán, Diego Sarmiento, Ana María Belalcázar de Galvis, realizaron un estudio de remoción de cobre y níquel, por intercambio catiónico con una zeolita natural, Se realizaron ensayos en cochada y en columna, alcanzando este último un mayor acercamiento al equilibrio. En los ensayos de regeneración, la zeolita sódica concentró el cobre hasta 23,5 veces, con respecto al valor que presenta en los enjuagues de los baños de recubrimiento en medio ácido, mostrando su potencialidad, para usarla en el tratamiento de estos residuos, por su efectividad y bajo costo. [8]

Otro estudio realizado en Cuba por J. M. Rodríguez Díaz, J. O. Prieto García; P. J. Villegas Aguilar; A. Curbelo Sánchez; B. Bucki Wasserman, A. Mollineda Trujillo, fue el uso de la Zeolita Sódica, como intercambiador de iones Plomo (II), En este estudio se demostró, que el proceso de intercambio iónico para la eliminación de iones plomo(II), mediante la zeolita sodificada, se ve favorecido a 25° C y el proceso de eliminación de iones plomo(II) es espontáneo, dado los valores de la energía libre estándar. [9]

De acuerdo con estos estudios mencionados, se optó por desarrollar esta experiencia con zeolita clinoptilolita, porque es la más accesible en el mercado y es la que se ha desarrollado mayor investigación de intercambio iónico con algún metal pesado. Si bien no hay investigaciones directas con zeolita en la recuperación de Cu^{+2} desde un relave, se va a analizar qué tan efectivo o no puede llegar a ser.

1.4 DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

La riqueza de los yacimientos en Chile hizo que muchas empresas no se interesaran del valor contenido en los relaves, pero la caída de las leyes, la dificultad de explotación y la escasez de nuevos yacimientos han llevado a mirar con otros ojos el potencial de estos gigantescos volúmenes depositados.

Recuperar valor desde los residuos mineros, es un tema nuevo para la minería chilena. A pesar de sus magnitudes, históricamente los relaves y tranques mineros, han sido casi invisibles para la discusión nacional. Solo en las últimas décadas, a partir de la tramitación de permisos ambientales, y oposición por comunidades, ha permeado a la opinión pública.

De acuerdo con la última actualización de “Catastro Nacional de depósitos de Relaves” realizados el 2021, por el Servicio Nacional De Geología y Minería (Sernageomin), registraron 757 depósitos identificados, con 112 activos, 467 no activos, 173 abandonados y 5 en construcción.

1.4.1. El cobre en los relaves

La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca) del yacimiento que se explota, pero sólo una fracción corresponde al elemento de interés económico, que se desea recuperar. Una vez que ese material ha sido finalmente molido y concentrado por proceso de flotación, en el cual se utiliza agua, aire y sustancias químicas, se obtiene el concentrado y el resto del material pobre en cobre, se denomina relave, y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable.

El descarte o cola comúnmente llamado al relave, puede poseer elementos valiosos para su recuperación, como lo son residuos de cobre, molibdeno y Hierro no tratado, así como las tierras raras. En general, estos elementos pueden ser valiosos si se les extrae en forma purificada, y pueden ser contaminantes si les abandona en un estado, que pueda ingresar a los diversos ciclos de la naturaleza. La extracción de todos los valores metálicos de un relave, previo a su depositación, sería una operación ventajosa, tanto por los valores de venta de los elementos purificados como por la reducción de costos de planes de cierre, al asegurar que se dispone de material efectivamente inocuo (que no hace daño a la salud humana o a la naturaleza).

1.4.2 Ley de cobre

Uno de los factores y beneficio que traería recuperar cobre desde los relaves, es por la caída de la ley que ha experimenta las últimas dos décadas el cobre. El hecho de tener menores leyes afecta directamente a los costos de los proyectos mineros. La ley de cobre es la medida que describe la concentración del cobre fino, contenido en un yacimiento. En la siguiente tabla se muestra la ley promedio de mineral de cobre, en las operaciones mineras en Chile, por el tipo de proceso, elaborada por Cochilco, sobre la base de información de las principales empresas mineras. Tabla 1-2 muestra la Ley promedio de mineral de cobre, en las operaciones mineras en Chile por tipo de proceso.

Tabla 1-2 Ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile por tipo de proceso.

%	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Concentradora	0,92	0,87	0,85	0,89	0,9	0,87	0,81	0,8	0,78	0,78
Lixiviación Heap	0,67	0,65	0,66	0,66	0,67	0,64	0,6	0,61	0,51	0,67
Lixiviación Dump y/o ROM	0,43	0,43	0,49	0,41	0,43	0,4	0,39	0,35	0,34	0,33
Promedio Chile	0,75	0,7	0,72	0,71	0,72	0,69	0,65	0,65	0,61	0,67

Fuente: Juan Ocaranza, (2000-2019). Anuario de estadísticas de cobre y otros minerales, pág 86, Cochilco.

A partir de toda la información entregada anteriormente, debemos establecer parámetros que nos permitirán realizar la mejor recuperación de cobre, desde los relaves, con zeolita, en base a los datos recopilados de otros estudios previamente mencionados.

1.5. PARÁMETROS Y VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL Cu^{+2}

Algunos de los parámetros a considerar para este trabajo según lecturas previas es el tamaño de partícula de la zeolita, por otro lado, el tiempo de agitación de la solución para que ocurra el intercambio iónico, la temperatura, el pH y la concentración tanto de relave como de zeolita.

1.5.1. Tamaño de partículas (granulometría)

La granulometría se refiere a la variación de tamaño de partícula y para llevar a cabo el intercambio iónico es necesario que la zeolita cumpla con un tamaño promedio de partícula correcto.

La zeolita clinoptilolita obtenida para esta experiencia fue comprada en farmacia y su granulometría es desconocida, por lo cual, se hace importante definir su tamaño.

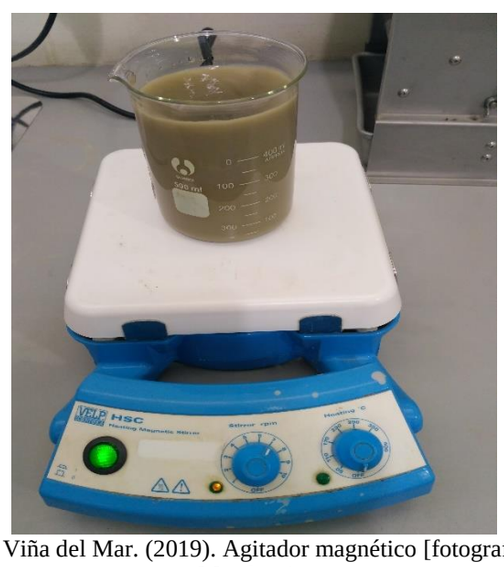
Según estudios de la Sociedad de Industria Química de España se han realizado pruebas con zeolita Clinoptilolita con un tamaño de partículas con un diámetro promedio de 0,2-2mm. [2]

En el caso de los relaves las bandas granulométricas van entre 43.79µm y 86.43µm según estudios realizados por la Universidad de Chile.

1.5.2. Agitación

Se define como agitación al efecto de mover con frecuencia de un lado a otro, una sustancia. La agitación se debe realizar con un agitador magnético dispuesto en el laboratorio, esta debe ser constante y con la suficiente fuerza, para que de este modo las partículas queden siempre en suspensión, durante el tiempo requerido para realizar el intercambio iónico.

Los agitadores magnéticos son dispositivos, que se componen de una pequeña barra magnética o de agitación y una placa que tiene una serie de electromagnetos, dispuestos en forma circular, con el fin de crear un campo magnético rotatorio. Encima de esta placa se dispone un contenedor (matraz o vaso precipitado), con la barra de agitación, conteniendo algún líquido para agitar, donde el campo magnético rotario, ejerce su influencia sobre la barra de agitación y propicia su rotación. Este instrumento suele estar equipado con calefacción y las temperaturas que se pueden alcanzar varían en unos pocos grados hasta, 300°C, dependiendo de la calidad profesional del instrumento. Ver figura 1-3.



Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Agitador magnético [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 1-3. Agitador Magnético.

1.5.3. Temperatura

Según la RAE (Real Academia Española), se define como temperatura a la "Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el grado kelvin (K)".

Para efectos de este trabajo se mide la temperatura ambiente en grados Celsius (20±5°C), lo cual equivale a 293±5 grados K.

En el caso que se quiera acelerar el proceso de recuperación de cobre se debe aumentar la temperatura, la cual actúa como catalizador en la reacción de absorción del metal, mediante el mismo agitador magnético se puede controlar la temperatura al momento que ocurra la reacción. También una vez realizada la solución, es necesario llevarla a una estufa con temperatura, para su secado y análisis químico.

1.5.4. pH

El pH es un parámetro que indica si una solución es ácida o alcalina, y se mide en una escala de 0 a 14, donde los valores de pH de 0 a 6 son clasificados como ácido, de 8 a 14 alcalino y el 7 indica un pH neutro, como se muestra en la figura 1-4.

Fuente: Federico Olarte, (2021). pH en el cuerpo y pH en el agua. Eco-vida solar.

Figura 1-4. Escala de pH.

El pH es uno de los parámetros de mayor relevancia al momento determinar la manera de aumentar la recuperación de una especie útil, ya que para cada elemento existe un rango de pH específico al cual su potencial de reacción será el óptimo.

Existen diferentes tipos de medidores de pH, como lo son las tiras medidoras de pH, cuyo funcionamiento es muy intuitivo, sencillo y limpio. Se meten a la disolución durante 2 segundo y posteriormente se compara el color que ha salido en las tiras con el patrón que viene en la propia caja. Existen también las gotas indicadoras de pH, funcionan de tal forma que, introduciendo unas gotitas en el líquido a analizar, éste se va a volver de un color, que, comparándolo con el patrón, nos dará el valor del pH; y como último existe también el pHmetro Digital que por su mayor exactitud en los resultados y por su disponibilidad es el instrumento utilizado para el desarrollo de esta investigación.

1.5.5. Concentración

La concentración química determina la proporción de soluto y solvente en una solución química**.**

La concentración química es la cantidad en que se encuentran las sustancias que se disuelven (soluto) en relación con la o las sustancias que lo disuelven (solvente). En este sentido, la cantidad de soluto siempre será menor al solvente para que se considere una solución.

La preparación de una solución química requiere de calcular las medidas de soluto y solvente que determinará la concentración de la solución y el tipo de solución.

Las concentraciones de las soluciones se expresan por molaridad, molalidad o fracción molar.

Se es necesario definir tanto la concentración del relave, la zeolita para el desarrollo de este trabajo y también el solvente que vendría siendo el agua. [10]

1.5.5.1. Medidas de concentración química

Las medidas de concentración de soluciones químicas son determinadas por unidades físicas y unidades químicas de concentración:

Las unidades físicas son aquellas que definen la proporción entre el soluto y el solvente en masa, volumen o sus partes.

Las unidades químicas, por otro lado, definen la concentración de la solución por moles o equivalentes químicos que presenta el solvente.

1.5.5.2. Unidades físicas de concentración de soluciones

Las unidades físicas de concentración de soluciones expresan la proporción de soluto en peso, volumen o partes en relación con la cantidad de solvente.

Las medidas físicas de las concentraciones químicas y sus fórmulas son las siguientes:

- Peso sobre peso

Peso sobre peso (%p/p), o también masa sobre masa (m/m) expresa el porcentaje de peso o masa de soluto con relación al peso o masa de solución:

$$\%\mathrm{p/p} = \frac{peso\ de\ soluto}{peso\ de\ solución} \times 100$$

- Volumen sobre volumen

Volumen por volumen (%v/v) indica la proporción del volumen del soluto en el volumen total de la solución:

$$\%\text{v/v} = \frac{volumen\ de\ soluto}{volumen\ de\ solución} \times 100$$

- Peso sobre volumen

Peso sobre volumen (%p/v) representa el peso del soluto con relación al volumen de la solución:

$$\%\text{p/v} = \frac{peso\ de\ soluto}{ml\ de\ solución} \times 100$$

1.5.5.3. Unidades químicas de concentración de soluciones

Las unidades químicas de concentración de soluciones calculan la cantidad de moles o de equivalentes químicos, de un soluto en un solvente. Las medidas químicas de concentración y sus respectivas fórmulas son:

- Molaridad (g/l)

La molaridad es el número de moles de soluto en litros de disolución. Un mol es una cantidad de átomos de carbono expresado en la constante de Avogadro. Para determinar el número de moles o masa molar de un elemento basta consultar una tabla periódica. El número que se encuentra debajo del símbolo químico del elemento y también es conocida como masa atómica.

Para calcular la molaridad de una solución se debe usar la siguiente fórmula:

$$Molaridad\ (M) = \frac{N°\ de\ moles\ de\ soluto}{litro\ de\ disolución}$$

Para determinar el número de moles de un soluto se debe calcular la masa del soluto, a través de la siguiente fórmula:

$$masa\ del\ soluto = \frac{gramos\ de\ soluto}{\text{masa molar}}$$

En este caso, la masa molar se calcula multiplicando la masa atómica de cada elemento, por la cantidad de átomos que indica la fórmula y luego sumando el resultado de cada elemento.

- Molalidad

Para la preparación de soluciones de concentraciones de una cantidad determinada de molalidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$molalidad\ (m) = \frac{\text{Número de moles de soluto}}{\text{kilogramos de disolución}}$$

Para el cálculo de moles de un soluto, se busca la masa atómica o masa molar, que se encuentra debajo de cada elemento químico de la tabla periódica.

En base a estos parámetros entregados, se desarrollará el procedimiento que se mencionará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 2:

PREPARACIÓN EXPERIMENTAL

2. PREPARACIÓN EXPERIMENTAL

A continuación, se describen métodos para recuperar minerales desde relaves, el trabajo experimental, los equipos utilizados y las condiciones de trabajo en que se desarrolla este ensayo, para poder efectuar un procedimiento de trabajo, para la recuperación del Cu^{+2}. Cabe mencionar que, si bien existen formas de recuperación de minerales desde relaves, no existe un método como el que se plantea en este trabajo.

2.1. FORMAS DE RECUPERACIÓN DE METALES EN RELAVES

Existen muy pocos procesos de recuperación de metales desde los relaves, ya que antes, el porcentaje mineral que queda en los relaves se desestimaba, ya que no era factible su recuperación. Hoy en día esto ha cambiado porque las leyes han bajado y se necesita recuperar el mayor porcentaje posible de mineral, es por esto, por lo que se han ido desarrollando diferentes procesos con este fin.

2.1.1. Método por Flotación

55

Minera Valle central, es una minera en la que transforma un pasivo ambiental en un activo económico y social llevan 28 años recuperando cobre y molibdeno desde relaves frescos y antiguos, provenientes de Codelco Chile, División El Teniente. Minera Valle Central procesa alrededor de 130.000 t/d de relaves, con una ley de 0,12% de cobre total. También está facultada para extraer relaves antiguos, que han sido depositados en el Tranque Cauquenes, entre los años 1939 y 1977.

Para vaciar los tranques, la firma utiliza el método de monitoreo hidráulico, que ofrece ventajas competitivas en costo, tiempo de implementación, rendimiento y eficiencia. Actualmente, este método es usado en la explotación y vaciado del Tranque Cauquenes

Los relaves son transportados por el canal de relaves desde el concentrador de Colón, estos descartados son desviados hacia la planta de Minera Valle central para ser re-procesados y obtener cobre y molibdeno. Son extraídos mediante la técnica de monitoreo hidráulico, que consiste en la inyección de agua a alta presión en el relave depositado, disgregando el mineral y produciendo una pulpa que contiene entre otros, cobre y molibdeno. Ver figura 2-1. Esta pulpa ingresa a la planta de flotación para su procesamiento y recuperación de los elementos de interés. Los descartes de la Planta de flotación son enviados a espesadores para la separación de concentrado de cobre y molibdeno. [11]

Fuente: Fuente: Correa, E. (2019). Relaves mineros, pasivos transformados en activos. Minera Valle Central

Figura 2-1. Técnica de monitoreo Hidráulico en relave

2.1.2. Método por Lixiviación

Otro método que se ha probado es para recuperar níquel, cobre y cobalto de relaves, este método adopta la autorreactividad entre las aguas residuales ácidas y los relaves producidos durante la producción de minas de cobre y níquel, para realizar una lixiviación soluble en ácido, a los relaves, reduce una gran cantidad de residuos sólidos y, simultáneamente, enriquece y recupera metales valiosos, como Ni, Cu y Co, para obtener productos de alto valor agregado. El método realiza los propósitos de controlar los desechos, a través de los desechos, reducir el consumo, aumentar el rendimiento y la eficiencia, reducir las emisiones y la cantidad apilada y prevenir la contaminación ambiental, y proporciona un apoyo tecnológico para el desarrollo de minas económicas de reciclaje, con contaminación reducida. [12]

Por otra parte, el método de lixiviación ácida por agitación, de un relave proveniente de flotación de minerales sulfurados de cobre, como vía de tratamiento y generar solución ácida que pueda alimentar una planta de SX-EW.

2.2. PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Para comenzar estos ensayos de laboratorio, primeramente, se procedió a leer investigaciones realizadas anteriormente, para guiarse en los procedimientos a realizar, sin embargo, estas experiencias anteriores no son iguales al procedimiento que se realiza, por lo tanto, sólo sirvió para tener una visión general del proceso, respetando algunos de los parámetros entregados en las previas investigaciones y tomando atención a las variables descritas en el Capítulo I. A continuación, se detalla los pasos a seguir que se llevó a cabo, con el fin de proponer un procedimiento para el desarrollo de esta experiencia.

2.3. EQUIPO EXPERIMENTAL

Los equipos experimentales que se ocuparon para realizar las pruebas, tanto para la recuperación como para el acondicionamiento de la zeolita, son los que se describen a continuación.

El primer equipo corresponde a un agitador magnético marca Velp scientifica, modelo HSC, que se utiliza para aplicar la agitación requerida a la solución, está compuesto de una placa en cerámica blanca, con un calefactor de hasta 400°C y velocidad de hasta 1000 rpm. Esta agitación se realiza por medio de una barra magnética, que se introduce en un vaso precipitado con una solución, creando así una especie de reactor Batch, los vasos precipitados utilizados tenían una capacidad de 500ml y 600ml.

El segundo equipo es un pH-metro digital, que permite tomar las mediciones continuas de las soluciones con el pH que presentan, con una precisión de 0,01.

El tercer equipo es una estufa u horno de secado marca Memmest, modelo Ufe 500, que permite secar las muestras que lo requieran con aire caliente.

El cuarto equipo es un desecador que permite eliminar la humedad de una determinada sustancia.

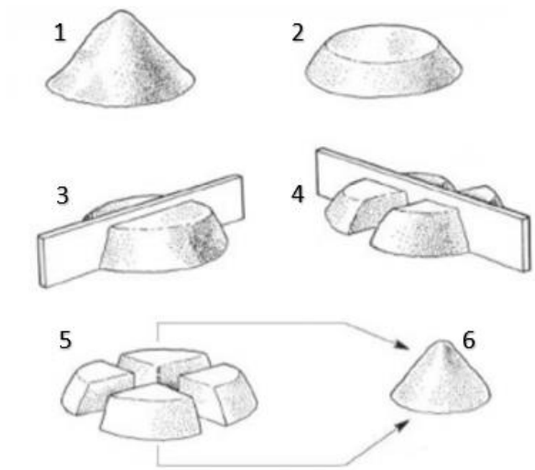
El quinto equipo es una tamizadora que permite agitar los tamizadores por un determinado tiempo y potencia, de esta forma se podrá definir la granulometría del material a emplear. Los tamices que se utilizaron son los dispuestos en el laboratorio de marca W.S. Tyler y Dual Manufacturing CO., estos tamices están compuestos por una malla o rejilla metálica tupida, que se encuentra sujeta a un aro, se diferencian por su número, lo cual indica la abertura de la malla, mientras más alto el número más tupida la malla.

El sexto equipo es una balanza marca Shimatzu modelo UX620H, que entrega el pesaje de lo que se requiera usar.

2.4. ROLEO Y CUARTEO

Este método es manual y consiste primeramente en mezclar el relave a través de un paño roleador. Este roleo se realiza por dos personas que sujetan los extremos y al tirar de ellos se hace rodar el material de un extremo a otro, homogenizando la muestra, esta operación se realizó durante 7 minutos. Luego el material homogenizado, queda en el centro de este paño roleador y se comienza a dar forma de torta, esta se divide posteriormente en cuatro partes, los más simétricas posible, luego se escogen dos lados opuestos con los que se trabaja, formando la muestra y los otros dos restantes se dejan en el recipiente donde estaba la muestra porque no se ocuparan. Figura 2-2 muestra la

secuencia del cuarteo. El relave fue puesto a este método para la homogenización completa de la muestra.



Fuente: Fuente: Quijandria, S. (2016, 31 mayo). El Cuarteo - Un Muestreo Representativo. R-Chemical. Recuperado 20 de noviembre de 2021.

Figura 2-2. Secuencia de cuarteo

2.5. TAMIZADO

Para seleccionar el tamaño de partícula, y definir la granulometría, se utilizan tamices, que constan de un contenedor circular, con una malla con aberturas en su fondo. Dichos orificios son los encargados de retener o dejar caer, las partículas del tamaño que corresponda. Los tamices poseen diferentes diámetros de abertura de malla, de esta manera se sabe el tamaño promedio del mineral con el que se está trabajando. Pueden ser de bronce o de acero.

Al momento de realizar el tamizaje, se deben determinar las mallas que se van a utilizar, tanto para el relave como de la zeolita.

2.6. PREPARACIÓN DE LA ZEOLITA

A continuación, se describe el proceso desarrollado para el acondicionamiento de la zeolita, este proceso es clave en la recuperación de cobre para obtener mejores resultados.

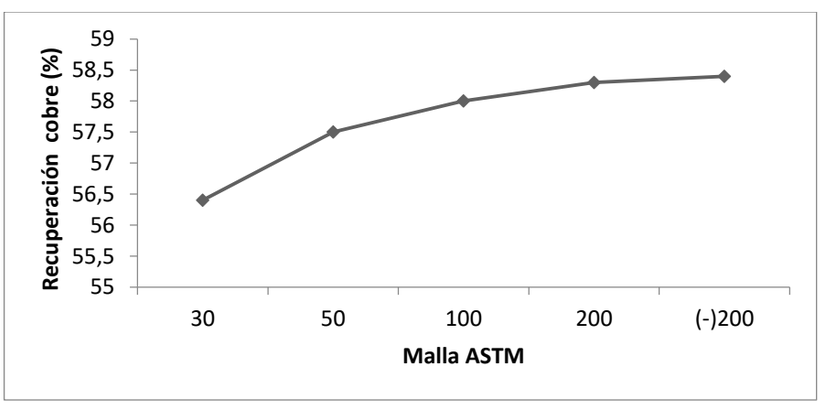
2.6.1. Granulometría de la zeolita

En primer lugar, se tamiza la zeolita para así determinar la granulometría que posee. En este ensayo se debió tamizar en dos ocasiones, ya que en primera instancia la elección de los tamices no fue la más adecuada, se seleccionó en primer lugar tamices #70, #50 y #45, para tamizar 30g de Zeolita Clinoptilolita por 5 minutos, a una amplitud de 1,5. Se obtuvo como resultado a toda la zeolita en el fondo, por lo tanto, se volvió a hacer una selección de tamices esta vez #45, #60, #80, #100 y #140 con 30g de Zeolita por 10 minutos y amplitud 1,5.

Esta vez se pudo determinar que la granulometría de la zeolita a utilizar es bajo malla #140 Tyler, lo cual corresponde aproximadamente a 0,106 milímetros de abertura.

Según pruebas realizadas en el 2011 por los autores P. Tapia, O. Pavez, M. Santander, C. Aguilar, H. Miranda, demostraron que a medida que disminuye el tamaño de la zeolita, la remoción de cobre se incrementa muy levemente, así la remoción de cobre aumenta de 96,4 a 98,4%, al variar la granulometría de la zeolita de +30 a –200 mallas ASTM, respectivamente. Ver grafica 2-1.

Cabe destacar que la zeolita utilizada es procedente de Chile y se distribuye principalmente para fines medicinales por la empresa Vitaorganics. Ver Figura 2-3.



Fuente: Tapia, P., Pavez, O., Santander, M., Aguilar, C., & Miranda, H. (2011). Utilización de una zeolita natural en la sorción de iones cobre. Revista de la Facultad de Ingeniería.

Gráfico 2-1 Recuperación de cobre en función del tamaño de las partículas de zeolita según estudios realizados en el año 2011

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Muestras de zeolita [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 2-3. Muestra de zeolita en vidrio reloj.

Tamizaje de zeolita se muestran en la Tabla 2-1, estos datos se utilizan para determinar su granulometría.

Tabla 2-1 Tamizaje de la zeolita

Malla Tamiz (#)	Peso (g)	Peso (g) después de tamizar
45	356,2	356,3
60	535	535,4
80	532,4	533,1
100	350,5	353,1
140	336,2	344

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Peso de cada tamiz utilizado con muestra de zeolita. [Tabla de datos]. En Laboratorio de Metalurgia.

2.6.2. Acondicionamiento de la Zeolita

Una vez establecida la granulometría, se debe hacer un baño de Cloruro de Sodio (NaCl) a la zeolita, para potenciar su capacidad de intercambio iónico, la solución realizada de NaCl posee una concentración 1M, por lo tanto, a 500mL de agua desionizada, se le agregó 29,22g de NaCl, posteriormente se llevó al agitador magnético, hasta lograr su disolución a temperatura ambiente. Para lograr el resultado esperado, se realizaron los siguientes cálculos:

En primer lugar, la ecuación a resolver es la de Molaridad, por lo tanto, se debe tener al menos 2 de las variables requeridas, para este caso se necesitó desarrollar una concentración 1 M en 500 mL de solución, por lo tanto, sólo resta saber cuántos moles de

soluto eran necesarios, lo cual lleva a otra ecuación, ecuación 2-2, que representa el cálculo de los moles del soluto en cuestión (NaCl).

$$M = \frac{moles\ de\ Soluto}{L\ de\ solución} \rightarrow 1M = \frac{moles\ soluto}{0{,}5\ L} \longrightarrow 0{,}5 = moles\ de\ soluto$$

Ecuación 2-1 Cálculo de moles de soluto a través de Molaridad (concentración).

$$Mol = \frac{g\ de\ soluto}{Masa\ molar} \rightarrow 0{,}5\ mol = \frac{g\ soluto}{58{,}44 g\ mol} \rightarrow g\ soluto\ (NaCl) = 29{,}22$$

Ecuación 2-2 Cálculo de gramos de soluto a través de moles.

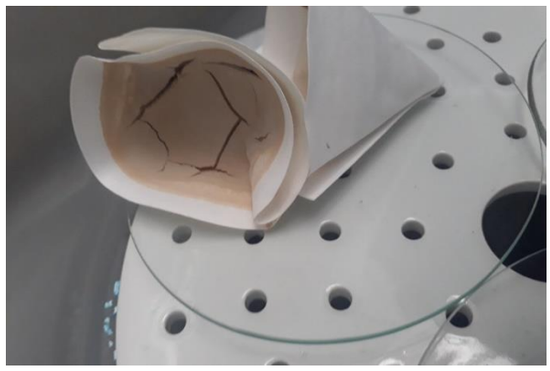
Luego de realizado el procedimiento anterior, se agregó 29,74g de Zeolita a la solución anterior, se llevó al agitador magnético por 15 minutos a 500 rpm a temperatura P k ambiente. Enseguida se llevó a filtrar la solución en 3 matraz Erlenmeyer (250 mL cada uno), con un embudo y papel filtro, se muestra en la figura 2-4.

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Muestras de zeolita filtrándose en matraz Erlenmeyer [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 2-4. Muestras de zeolita filtrándose en matraz Erlenmeyer.

Luego de filtrar toda la solución, se retiró el papel filtro y se pusieron las muestras en un vidrio reloj, para llevarlas a la estufa por 5 a 6 horas aproximadamente a 100°C.

Al retirar del horno de secado el vidrio reloj con el papel filtro, impregnado de zeolita, se dejó en un desecador por aproximadamente 4 horas. Como se muestra en la Figura 2-5. a continuación.



Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Papel filtro en desecador [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 2-5. Papel filtro en desecador

Luego se retiró y depositó la zeolita en un mortero, para volver a obtener la zeolita con la granulometría anterior, ya que esta al decantar en el papel filtro, se compacto en este, quedando una gran masa homogénea y solidificada, de todas formas, sin un mayor esfuerzo, la zeolita volvió a su forma original, como se muestra en la Figura 2-6.

Se pesó la zeolita para calcular la pérdida que quedo en los papeles filtro, dando como resultado 28,5 g, por lo tanto, sólo se perdió 1,24 g de material zeolíticos.

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Zeolita sódica final en mortero [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 2-6. Zeolita sódica final en mortero

2.6.3 Preparación de las soluciones de relave

El siguiente procedimiento por realizar, fue depositar el concentrado de relave seco, en un paño de roleo y proceder a rolear la muestra por 7 minutos, enseguida se cuarteo y seleccionó 2 lados opuestos de muestra para trabajar. Posteriormente el paso fue determinar qué cantidad de concentrado de relave, había que agregar a una solución de 400 mL de agua desionizada, además determinar cuanta zeolita es necesaria para cada concentración.

Tras leer varios informes y comparar datos, se llegó a la conclusión que se harían 3 muestras diferentes cada una con 400 mL de agua destilada y 4 g de Zeolita sódica, la primera contiene 10 g de relave, la segunda 20 g y la tercera 35 g; cabe destacar que, en el análisis realizado al relave, sólo hay un 5% aproximadamente de cobre presente, por lo tanto, la cantidad de muestra de relave que contiene cobre, va desde 0,5 g, 1 g y 1,75g respectivamente.

Para las muestras se tomaron 3 vasos precipitados de 500 ml, agregándole 400ml de agua destilada con el relave y los gramos de zeolita correspondiente, ver Figura 2-7. Se agitó con una varilla de vidrio manualmente, para mezclar todo con el agua y se llevaron a un agitador magnético por 20 minutos, a 700 rpm cada muestra.

Una vez terminada la agitación, se midió el pH de cada muestra, las que arrojaron como promedio un pH 8. Se cubrieron con papel plástico para que decanten y no entren en contacto con ningún contaminante, luego se extrajo el agua con la ayuda de una bomba de vacío, una vez extraída el agua, se volvió a colocar las tres muestras en vidrio reloj, debidamente marcado, luego se llevaron nuevamente a la estufa por 6 horas. Transcurridas las 6 horas se sacaron las muestras de la estufa y se envasaron para su posterior análisis químico.

El relave usado para desarrollar esta experiencia fue entregado por un profesor que realizo flotación en una de sus asignaturas y luego el relave obtenido se mandó a analizar para saber su composición química por la empresa Bruker.

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Soluciones de relave y zeolita [fotografía]. En Laboratorio de Metalurgia.

Figura 2-7. Se muestran las 3 soluciones diferentes con las cantidades de relave y zeolita correspondiente.

2.7. EJECUCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A continuación, se presenta el bosquejo final del procedimiento experimental, para la recuperación de cobre (II) de un relave de flotación con zeolita Clinoptilolita, para llevar a cabo en el laboratorio de la carrera.

2.7.1. Procedimiento experimental

Para la siguiente experiencia, se va a utilizar zeolita Clinoptilolita, bajo malla #140 y relave bajo malla #100.

Materiales:

- Zeolita
- Relave
- Serie tamices
- NaCl concentrado
- Agua desionizada
- Paño roleador
- Balanza
- Agua destilada
- Pizeta
- 3 vasos precipitados de 500 mL y 1 vaso precipitado de 600 mL
- 3 vidrios reloj medianos y 1 vidrio reloj pequeño
- 1 probeta de 1 L y 1 probeta de 100 mL
- Agitador magnético
- pH-metro
- Espátula y brocha
- 3 papel filtro
- 3 matraz Erlenmeyer de 250 mL
- 3 embudos
- Papel Film
- Varilla de vidrio
- Cronómetro
- Desecador
- Bomba de Vacío

Procedimiento:

1. Implementarse con los EPP correspondientes
2. Tamizar 30g de zeolita con una serie de tamices #45, #60, #80, #100 y #140 por 10 minutos a una amplitud 1,5.

3. Hacer el cálculo de los gramos de zeolita y NaCl.
4. Pesar 30 g de la zeolita en un vidrio reloj y luego 29,22 g de NaCl.
5. En un vaso precipitado de 600 mL agregar los 29,22 g de NaCl y 500 mL de agua desionizada, agitar en el agitador magnético a 25°C hasta disolver.
6. Luego agregar los 30g de zeolita a la solución anterior, llevar a agitación por 15 minutos y 500 rpm.
7. Disponer los 3 matraces Erlenmeyer con su respectivo embudo.
8. Para utilizar el papel filtro de la manera adecuada se debe seguir el siguiente procedimiento, teniendo en cuanta que no se debe manipular demasiado: primero se dobla por la mitad y luego nuevamente por la mitad. Obtendremos un cono con 4 hojas, abrir solo separando 1 hoja de las demás y colocar en el embudo, para fijarlo, mojar ligeramente con agua destilada.
9. Tomar el vaso precipitado con la solución y vaciar en cada embudo, esperar que decante y repetir el paso.
10. Una vez decantada toda la solución, tomar los papeles filtro y dejar en vidrios reloj, llevar al horno de secado por 6 horas.
11. Sacar los vidrios reloj con papel filtro del horno y dejar en el desecador por 3 horas.
12. Sacar los papeles filtro del desecador y vaciar la zeolita seca en un mortero, presionar hasta lograr aspecto original.
13. Rolear por 7 minutos el concentrado de relave, cuartear y seleccionar 2 extremos.
14. En 3 vasos precipitados agregar 400 mL de agua desionizada.
15. Hacer el cálculo de los gramos de relave a utilizar.
16. Agregar 10g, 20g y 35g de relave a los vasos y marcarlos para identificarlos.
17. Agregar 4 g de zeolita a cada uno y mezclar con una varilla de vidrio.
18. Llevar al agitador magnético por 20 minutos a 700 rpm.
19. Tomar el pH de cada muestra, mientras se está agitando.
20. Envolver cada frasco en papel film y esperar que decanten los sólidos.
21. Una vez que decantan los sólidos, se extrae el agua con la ayuda de una bomba de vacío
22. Extraída el agua, se vuelve a colocar las tres muestras en vidrio reloj y luego llevarlas nuevamente a la estufa por 6 horas.
23. Transcurrida las 6 horas, se sacan las muestras de la estufa y se envasan para su posterior análisis químico.

Según este procedimiento, se evaluará en el siguiente capítulo que tan efectivo es la recuperación de cobre.

CAPÍTULO 3:

EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO, INSUMOS Y COSTOS DE APLICACIÓN

3.1. ANÁLISIS QUÍMICOS

Se puede definir la "Química Analítica", como una ciencia de medición, basada en un conjunto de ideas y métodos útiles en todos los campos de la ciencia. La Química Analítica se ocupa de separar, identificar y determinar la composición relativa, de cualquier muestra de materia. Por otro lado, se considera al "Análisis Químico", como la parte práctica de la "Química Analítica", que aplica los métodos desarrollados por la misma para la resolución de problemas.

El Análisis Químico de una muestra de materia, puede abordarse desde dos puntos de vista: análisis cualitativo y análisis cuantitativo. El análisis cualitativo establece la identidad química de las especies en la muestra. El análisis cuantitativo determina en forma numérica, la cantidad relativa de las especies que componen la muestra.

La técnica analítica es el medio utilizado para llevar a cabo el análisis químico, mientras que el método analítico, es un concepto más amplio pues no sólo incluye a la o las técnicas analíticas empleadas en un análisis, sino también todas las operaciones implicadas, hasta la consecución del resultado final.

3.1.1. Clasificación de los Métodos de Análisis

Para análisis cuantitativo se llevan a cabo 2 mediciones:

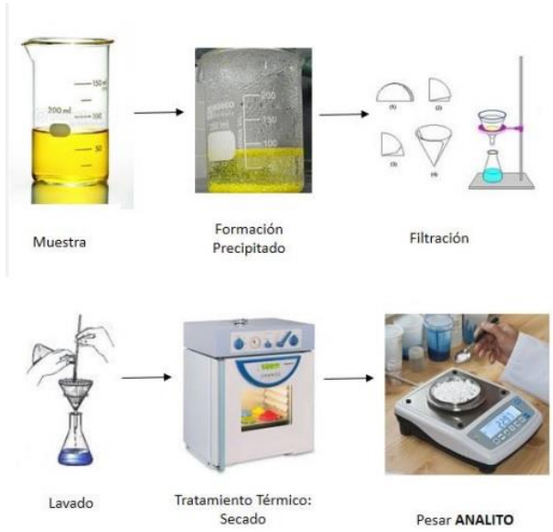
- Peso o volumen de la muestra a analizar
- Cantidad que es proporcional a la cantidad de analito presente en la muestra.

Los métodos analíticos se clasifican en función de la naturaleza de esta última medida, en este sentido hablamos de: métodos clásicos o químicos, métodos instrumentales, métodos de separación

3.1.1.1 Métodos Clásicos o Químicos

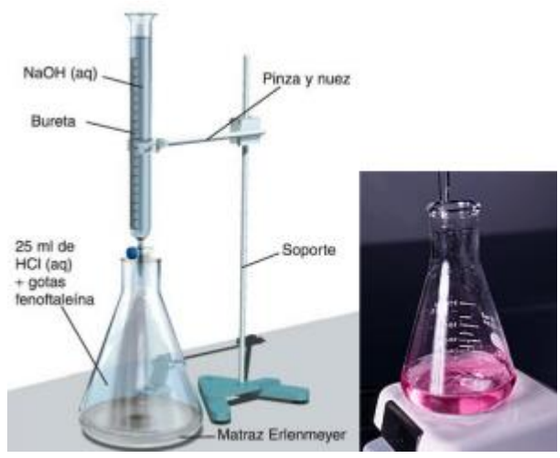
En los métodos gravimétricos se determina la masa de analito o de algún compuesto relacionado químicamente con él. En la figura 3-1 se muestra un esquema de gravimetría por precipitación.

En los métodos volumétricos se mide el volumen de una disolución de concentración conocida, que contiene la cantidad de reactivo necesaria, para reaccionar completamente con el analito. En la figura 3-2 se muestra cómo se disponen los equipos para el análisis volumétrico.



Fuente: USACH. (2016). Esquema de procedimiento en una gravimetría por precipitación [Ilustración]

Figura 3-1. Esquema de gravimetría por precipitación



Fuente: UV. (2021). Análisis volumétrico [fotografía]. uv.es

Figura 3-2. Metodología de análisis volumétrico

3.1.1.2 Métodos Instrumentales

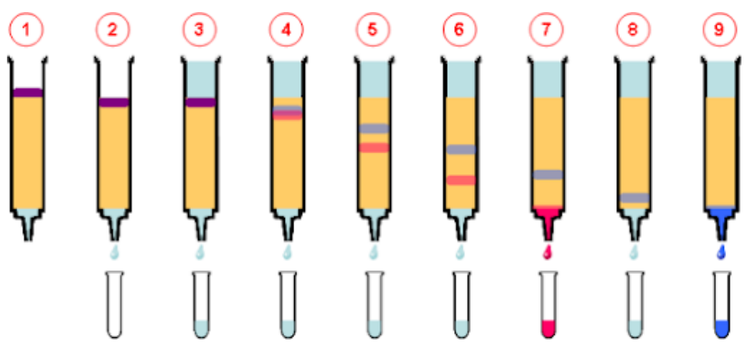
Los métodos electroanalíticos, conllevan la medida de alguna propiedad eléctrica como potencial, intensidad de corriente, resistencia o cantidad de electricidad.

Los métodos espectrofotométricos, se basan en la medida de alguna propiedad de la radiación electromagnética, tras la interacción con los átomos o moléculas de analito; o bien la producción de radiación electromagnética a partir del analito, cuando la materia ha sido sometida a algún tipo de excitación.

Existe un grupo misceláneo de métodos que implican la medida de la relación carga-masa, velocidad de desintegración radioactiva, calor de reacción, conductividad térmica, actividad óptica o índice de refracción.

3.1.1.3 Métodos de separación

Cuando se desarrollaron estos métodos, su finalidad inicial era la eliminación de interferentes, antes de proceder a aplicar la técnica analítica seleccionada. En la actualidad, existen métodos de separación que son métodos de análisis en sí mismos, como por ejemplo la cromatografía. [13] En la figura 3-3 se ilustra el proceso de cromatografía en columna, una de las formas que se puede realizar este método de separación.

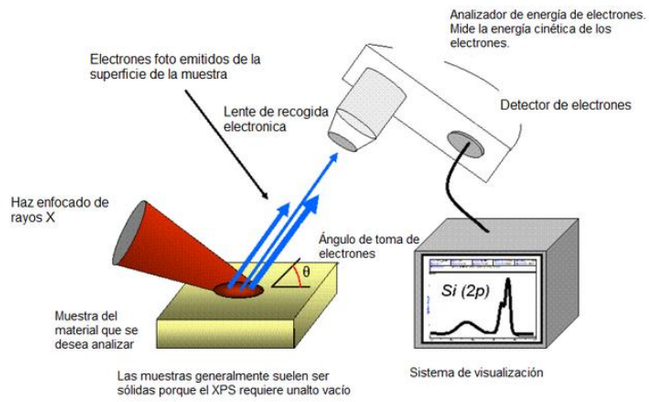


Fuente: Biomodel. (2021). Cromatografía en columna [Ilustración]

Figura 3-3. Cromatografía en columna

3.1.2.1 Espectrometría de rayos X

La Espectrometría de Rayos X, es un conjunto de técnicas que permite detectar y cuantificar la composición de la muestra de material desconocido, mediante su irradiación con Rayos X. Esta técnica se caracteriza por el hecho de que la radiación resultante del análisis se descompone en sus diferentes longitudes de onda o espectros, para el análisis de los elementos o compuestos que contiene la muestra. [14] Ver figura 3-4.



Fuente: Carloserp-2000. (2018). Espectrometría de rayos x [Ilustración]. Steemit

Figura 3-4. Esquema Espectrometría de rayos x

3.1.2 Tipo de análisis empleado

Para efectos de este trabajo, se realizaron dos tipos de análisis químico, el primero fue para análisis del relave en el que por espectrometría de rayos X, se puede determinar la cantidad de elementos que lo componen; el otro análisis para determinar el análisis de la zeolita fue por absorción atómica.

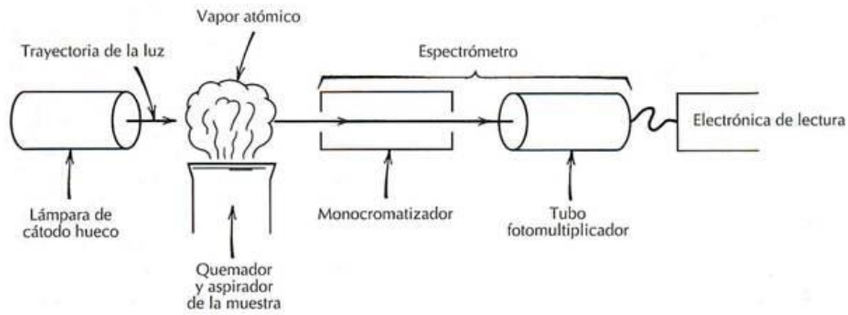
3.1.2.2 Absorción atómica.

La absorción atómica, es una técnica común para detectar metales en muestras ambientales, aguas, suelos y aire, así como muestras minerales, alimentos, productos químicos, aleaciones y fundiciones.

La técnica está basada en el hecho de que los átomos en estado fundamental de un determinado elemento absorben la energía emitida por una fuente de excitación del mismo elemento.

Los átomos del analito, presentes en una solución, son convertidos a su estado atómico, mediante el uso de una llama, horno de grafito o manta calefactora.

La intensidad de luz absorbida, puede ser medida contra una curva de calibración estandarizada, siendo la cantidad de energía absorbida, (a una longitud de onda característica) proporcional a la concentración del elemento en la muestra (en un intervalo de concentraciones limitado). [15] Ver figura 3-5.



Fuente: Cornelis, Klein. Manual de Mineralogía. Cuarta edición. 2001. Pag.147

Figura 3-5. Esquema de absorción atómica

3.2. EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

Para comenzar, este experimento utiliza varias técnicas aprendidas anteriormente en otros laboratorios, como roleo y cuarteo, filtración, tamizado, entre otras, lo que permitió recordar técnicas ya realizadas. Además, de utilizar el relave generado en el mismo laboratorio en experiencias de flotación, lo cual nos permite analizar muestras propias o bien en este caso, muestras de paralelos de primer año.

El procedimiento fue realizado con cierta complejidad, en cuanto a definir los pasos a seguir, si bien existían experiencias con zeolita y metales pesados, no eran claros con los tiempos de agitación, secado (en este punto se tuvo que volver en reiteradas ocasiones al laboratorio) y la concentración que se debía utilizar, tanto de zeolita como de relave.

A continuación, se presentan dos tablas, la primera tabla 3-1 representa la cantidad de cobre contenida en la muestra completa de relave, en la cual se analizó tres veces la misma muestra. Esta muestra de cobre se analizó por fluorescencia de rayos X, explicada anteriormente. Este análisis se desarrolló en Casa Central de la UTFSM con el apoyo de un profesor de la carrera.

En la segunda tabla 3-2, se muestran los resultados del análisis por absorción atómica de las 3 muestras de zeolita con relave, entregadas por el laboratorio del centro de minería PUCV.

Tabla 3-1 Cantidad de cobre presente en la muestra completa de relave

Nombre del elemento	%	+/- [*3]
Cu	5.166	0.138
Cu	6.156	0.150
Cu	5.431	0.140

La cantidad de cobre se analizó por fluorescencia de rayos X por la empresa Bruker, son tres lecturas de la misma muestra de relave.

Fuente: Laboratorio Casa Central UTFSM, (2018).

Tabla 3-2 Resultados de análisis de absorción atómica

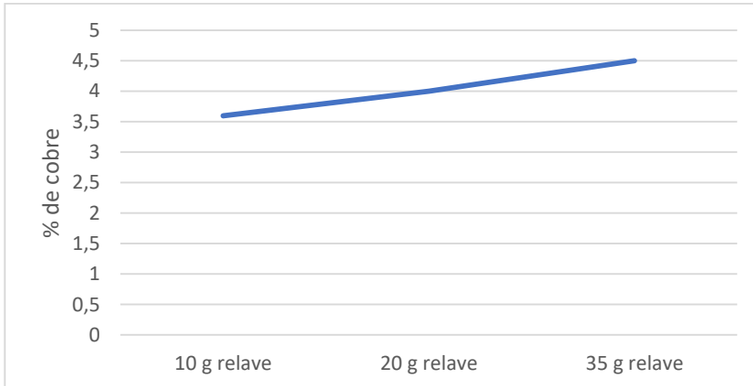
Identificación muestra	Metal	ppm	%
Muestra 1	Cu total	466	0,0466
Muestra 2	Cu total	486	0,0486
Muestra 3	Cu total	956	0,0956

Fuente: Monsalve, K., & Villarroel, F. (2019, noviembre). Informe resultados análisis (CM-AQ-RC-023-19). Centro de minería PUCV.

Si analizamos los resultados obtenidos por absorción atómica, en donde se determinó cuanto es el % de cobre, se puede determinar que la zeolita si logro contener el cobre presente, si bien el primer análisis fue de un 5% de Cu presente en la muestra completa de relave, por los gramos dispuestos en las tres diferentes muestras realizadas, la zeolita si logra su objetivo de capturar el cobre.

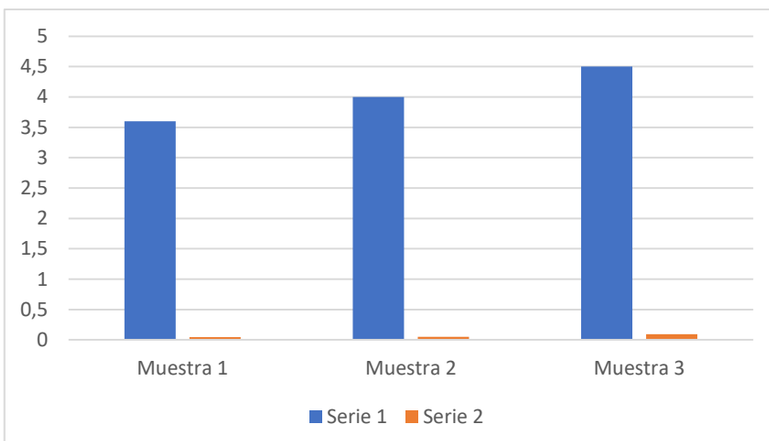
En el Gráfico 3-1, se muestra la curva en relación con el porcentaje de cobre contenido en la muestra con zeolita. A medida que los gramos fueron aumentando de relave el resultado contenido de cobre se fue incrementando, recordar que los gramos de zeolita fueron constantes.

En el Gráfico 3-2 se muestra el porcentaje de cobre en las muestras de relave con zeolita, antes de realizar la recuperación, comparado con el porcentaje de cobre en el relave, post análisis químico. Esta comparación, permite deducir que muestra es la que contiene mayor recuperación de cobre. La muestra completa de relave era de 1kg y esta contenía un 5% de cobre aproximadamente, por cada muestra 1, 2, 3 se ocuparon 10g de relave, 20g y 35g respectivamente. Considerando esto para la muestra 1, contiene aproximadamente un 0,5 g de cobre, muestra 2 1g de cobre y 1,75g de cobre para la muestra 3. Según los resultados la muestra 2, es la que recupero mayor porcentaje de cobre, absorbiendo un 98,75% del mineral, sigue la muestra 1, con un 98,6% y la muestra 3 como última, con un 97,7 %.



Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Porcentaje de cobre contenido en la solución de zeolita v/s los gramos de relave por cada muestra. En Laboratorio de Metalurgia.

Gráfica 3-1 Porcentaje de cobre contenido en la solución de zeolita más relave v/s los gramos de relave por cada muestra



Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2019). Porcentaje de cobre en las muestras de relave (serie 1) v/s el porcentaje de cobre en el relave post análisis químico (serie 2). En Laboratorio de Metalurgia.

Gráfica 3-2 Porcentaje de cobre en las muestras de relave con zeolita antes de la recuperación (serie 1) comparado con el porcentaje de cobre en el relave post análisis químico (serie 2).

3.3. CUADRO COMPARATIVO Y COSTOS

Para efectos de esta experiencia, los costos asociados se relacionan con la obtención de la zeolita clinoptilolita micronizada, en donde en tabla 3-3, se comparan tres precios que se ofrecen en el mercado, para su implementación en laboratorio. Otro costo que se realizó fue el del análisis químico de absorción atómica realizado por la universidad PUCV, el cual fue de $27.000, en este punto se podría ver la posibilidad de análisis químico en la misma sede o en casa central, para disminuir el costo o en su defecto, sería un gasto para considerar. En cuanto al resto de los insumos y equipo experimental, todo fue entregado por el laboratorio de metalurgia de la misma sede.

La cantidad de zeolita para desarrollar esta experiencia es 30 g, considerando la proyección por grupo de laboratorio, en donde cada paralelo tendrá 6 grupos, se necesitará un total de 540g de material zeolíco. Si se considera el precio de la empresa Aldea nativa expuesto en tabla 3-3 se tendría que comprar cuatro envases de 180g dando un total $29.970 en costo por material zeolítico sin considerar el costo de envío.

Si se considera el análisis químico realizado en la PUCV por los 6 grupos, este tendría un costo total de $162.000. Sumando ambos costos tanto de zeolita como análisis químico para el desarrollo de esta experiencia en el laboratorio, quedaría con un total de $191.970. En tabla 3-4 se encuentra el resumen de costos finales.

Tabla 3-3 Comparación de 3 precios de zeolita en el comercio

Distribuido por:	gramos	precio	Costo total
Viva vida	150	$14.990	$59.960
Aldea nativa	180	$9.990	S29.970
Emporio orgánico verde	180	$11.490	$34.470

Fuente: Viva vida (2000-2020), Aldea nativa (2021), Emporio orgánico verde (2020).

Fuente: Viva Vida. (2021). Zeolita power micronizada [Fotografía]

Figura 3-6 Zeolita Viva Vida 150 g

Fuente: Aldea Nativa. (2021). Zeolita polvo biozeolita [Fotografía]

Figura 3-7. Zeolita Aldea nativa 180 g

Fuente: Emporio orgánico verde. (2021). Zeolita mineral micronizada [Fotografía]

Figura 3-8. Zeolita Emporio orgánico verde 180gr

Tabla 3-4 Resumen de costos

	Costo
Zeolita	$29.970
Análisis químico	$162.000
Total	$191.970

Fuente: Aldea nativa (2021) Centro de minería PUCV (2019)

3.4. PROYECCIÓN EN LABORATORIO DE LA CARRERA

Para considerar una implementación de esta experiencia en el laboratorio de la universidad se debe considerar 40 alumnos por paralelo (3), en donde cada paralelo tendría 6 grupos en total, 4 grupos con 7 integrantes y 2 grupos con 6 integrantes. La capacidad del laboratorio es de 3 grupos a la vez, por lo tanto, la experiencia estaría completa en 2 sesiones por grupo, sin contar el tiempo que tarden los resultados del análisis químico.

La cantidad de zeolita para desarrollar esta experiencia es 30 g considerando la proyección por grupo de laboratorio en donde cada paralelo tendrá 6 grupos, se necesitará un total de 540g de material zeolítico.

Cada grupo debe preocuparse de ser ordenado y organizado con los tiempos, marcar sus muestras para no confundir con las de sus compañeros al momento de llevar a la secadora. Se recomienda que cada grupo se divida en 2 para que así avancen

simultáneamente con el acondicionamiento del relave y la zeolita, para optimizar tiempo de trabajo.

Tabla 3-5 Cuadro resumen distribución de paralelos

Paralelo 1 (40 alumnos)	Paralelo 2 (40 alumnos)	Paralelo 3 (40 alumnos)
Grupo 1 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 1** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 1** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7
Grupo 2 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 2** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 2** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7
Grupo 3 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 3** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 3** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7
Grupo 4 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 4** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7	**Grupo 4** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6 Alumno 7
Grupo 5 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6	**Grupo 5** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6	**Grupo 5** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6
Grupo 6 Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6	**Grupo 6** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6	**Grupo 6** Alumno 1 Alumno 4 Alumno 2 Alumno 5 Alumno 3 Alumno 6

Fuente: UTFSM Sede Viña del Mar. (2021). Promedio de alumnos que ingresan a la carrera.

3.4.1. Prototipo de experiencia en laboratorio

Guía laboratorio

Antecedentes generales:

Los relaves en nuestro país cada día aumentan y estos poseen aun porcentajes de Cu que se pueden recuperar, en búsqueda de una solución a la baja ley de cobre que estamos viviendo como país debido al agotamiento del recurso, se encuentra la zeolita, capaz de absorber metales, a través, de intercambio iónico.

Objetivo:

Recuperación de Cu^{+2} en relave de flotación con zeolita.

Materiales:

- Zeolita
- Relave
- Serie tamices
- NaCl concentrado
- Agua desionizada
- Paño roleador
- Balanza
- Agua destilada
- Pizeta
- 3 vasos precipitados de 500 mL y 1 vaso precipitado de 600 mL
- 3 vidrios reloj medianos y 1 vidrio reloj pequeño
- 1 probeta de 1 L y 1 probeta de 100 mL
- Agitador magnético
- pH-metro
- Espátula y brocha
- 3 papel filtro
- 3 matraz Erlenmeyer de 250 mL
- 3 embudos
- Papel Film
- Varilla de vidrio
- Cronómetro
- Desecador
- Bomba de Vacío

Ecuaciones de concentración

$$M = \frac{moles\ de\ Soluto}{L\ de\ solución}$$

$$Mol = \frac{g\ de\ soluto}{Masa\ molar}$$

Procedimiento:

1. Implementarse con los EPP correspondientes.
2. Tamizar 30g de zeolita con una serie de tamices #45, #60, #80, #100 y #140 por 10 minutos a una amplitud 1,5.
3. Hacer el cálculo de los gramos de zeolita y NaCl.
4. Pesar 30 g de la zeolita en un vidrio reloj y luego 29,22 g de NaCl.
5. En un vaso precipitado de 600 mL agregar los 29,22 g de NaCl y 500 mL de agua desionizada, agitar en el agitador magnético a 25°C hasta disolver.
6. Luego agregar los 30g de zeolita a la solución anterior, llevar a agitación por 15 minutos y 500 rpm.
7. Disponer los 3 matraces Erlenmeyer con su respectivo embudo.
8. Para utilizar el papel filtro de la manera adecuada, se debe seguir el siguiente procedimiento, teniendo en cuanta que no se debe manipular demasiado: primero se dobla por la mitad y luego nuevamente por la mitad. Obtendremos un cono con 4 hojas, abrir solo separando 1 hoja de las demás y colocar en el embudo, para fijarlo mojar ligeramente con agua destilada.
9. Tomar el vaso precipitado con la solución, y vaciar en cada embudo, esperar que decante y repetir el paso.
10. Una vez decantada toda la solución tomar los papeles filtro y dejar en vidrios reloj, llevar al horno de secado por 6 horas.
11. Sacar los vidrios reloj con papel filtro del horno y dejar en el desecador por 3 horas.
12. Sacar los papeles filtro del desecador y vaciar la zeolita seca en un mortero, presionar hasta lograr aspecto original.
13. Rolear por 7 minutos el concentrado de relave, cuartear y seleccionar 2 extremos.
14. En 3 vasos precipitados agregar 400 mL de agua desionizada.
15. Hacer el cálculo de los gramos de relave a utilizar.
16. Agregar 10g, 20g y 35g de relave a los vasos y marcarlos para identificarlos.
17. Agregar 4 g de zeolita a cada uno y mezclar con una varilla de vidrio.
18. Llevar al agitador magnético por 20 minutos a 700 rpm.
19. Tomar el pH de cada muestra mientras se está agitando.
20. Envolver cada frasco en papel film y esperar que decanten los sólidos.
21. Una vez que decantan los sólidos, se extrae el agua con la ayuda de una bomba de vacío
22. Extraída el agua, se vuelve a colocar las tres muestras en vidrio reloj y luego llevarlas nuevamente a la estufa por 6 horas.

23. Transcurrida las 6 horas, se sacan las muestras de la estufa y se envasan para su posterior análisis químico.

Completar los datos correspondientes al tamizaje de la zeolita y analizar que granulometría tiene.

Malla Tamiz (#)	Peso (g)	Peso (g) después de tamizar
45		
60		
80		
100		
140		

Pauta para Evaluación

El informe debe contener:

1. Portada
2. Resumen
3. Investigación Bibliográfica
   i. Describir la importancia de la zeolita y la importancia de reprocesar un relave
   ii. Describir el rol de las variables en el proceso (temperatura, agitación, granulometría, pH).
   iii. Definir Intercambio Iónico.
   iv. Describir la importancia del acondicionamiento de la zeolita.
4. Procedimiento experimental
   i. Registro descriptivo de lo realizado en la experiencia
   ii. Instrumentación utilizada.
5. Análisis de resultados (Discusión).
   i. Describir y comentar como ocurre el intercambio iónico entre la zeolita y el relave.
   ii. Construya la curva de granulometría de la zeolita.
   iii. ¿Afecta la cantidad de relave versus el de la zeolita?
   iv. ¿Qué muestra logra una mayor recuperación? Realizar tabla comparativa.
6. Conclusiones, comentar el efecto de las variables y resultados del proceso. (Individual).
7. Referencias.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre el primer capítulo:

Es un hecho que las leyes de cobre van en decadencia cada año, y por esta razón se han ido creando o bien modificando los procesos de obtención y recuperación de cobre, ya que cuando se comenzó con la explotación de este mineral en nuestro país era inimaginable llegar a leyes más bajas que un 0,6 como lo es hoy en día.

Con la modernización de procesos viene también rescatar hasta el último porcentaje de mineral posible, el uso de los relaves para recuperar cobre es una opción que no solo beneficia a la industria minera con el aumento de las leyes, ayuda también al medio ambiente, ya que en un futuro se podría reducir una porción de relave en los tranques a nivel país.

La zeolita al ser una resina natural es ideal para realizar un tratamiento que no utilice componentes artificiales, que empeoren la situación contaminante del relave, su capacidad de intercambio iónico favorece de gran manera la recuperación de cobre, lo cual permite realizar el mismo experimento con otros metales pesados.

Para optimizar el proceso, fue necesario estudiar de manera teórica el proceso que se iba realizar, junto con los parámetros que se desean aplicar para acercarse a un resultado esperado.

Sobre el segundo capítulo:

Tras la lectura de varios papers sobre tratamientos con zeolitas, se pudo crear un procedimiento en laboratorio para la recuperación de cobre, desde relaves de flotación, fue un trabajo de semanas probando diferentes variables, concentraciones, agitación, granulometría, entre otras. Finalmente, los parámetros establecidos dieron resultados favorables, el procedimiento en si no es difícil de realizar, ya que se utilizan técnicas anteriormente aprendidas, pero si se requiere de tiempo por las diferentes etapas que presenta, tiempo en tamizar, rolear, agitar, filtrar y secado.

Si bien en el procedimiento se establecen las variables de tiempo y concentración, fueron de los puntos más complejos a definir porque no existía claridad en los paper leídos, entonces se tuvo que probar buscando las mejores opciones logrando establecer las condiciones en el laboratorio.

Sobre el tercer capítulo:

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios ya que se puede observar en las tablas adjuntas la diferencia de porcentaje de cobre entre el relave de flotación y el relave tratado con zeolita, estos fueron los siguientes: En la primera muestra se obtiene 3,55% de Cu, mientras que el porcentaje de cobre en el relave de esa muestra, era de 3,6%, para la segunda muestra se obtiene 3,95% de Cu, en comparación con el 4% que contenía el relave, por último en la tercera muestra obtenemos 4,4% de Cu mientras que el relave utilizado contenía 4,5%. En conclusión, la muestra que obtuvo mejores resultados de absorción fue la muestra número 2, con una recuperación aproximadamente 98,75% de Cu.

Con estos resultados se pueden deducir las proporciones ideales de zeolita vs relave, para una próxima experiencia o en que bandas trabajar.

En relación con los insumos y costos, se logró establecer que el gasto de la zeolita no es elevado, pero si se considera el análisis químico, estos costos suben considerablemente, es por esto, que se tendría que evaluar un análisis en la misma universidad.

Recomendaciones:

Al ser una experiencia de laboratorio extensa, se recomienda realizar en grupos grandes, en donde se puedan dividir los tiempos de cada paso, en específico el acondicionamiento de la zeolita y relave.

Se deja abierta la opción de realizar el mismo procedimiento, para la obtención de otros metales presentes en los relaves, con un previo estudio, de tal manera de asegurar su recuperación. Por otra parte, sería ideal un análisis químico con mayor profundidad a la zeolita para identificar que minerales absorbió a parte del cobre o bien acondicionar la zeolita con otro tipo de sal, que sea a fin otros metales.

Sería ideal que se puedan realizar más muestras de relave, con diferentes concentraciones de zeolita, para tener una banda más amplia de resultados.

Para disminuir los costos, sería bueno buscar un análisis en la misma universidad y así considerar solo como costos la zeolita.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Sernageomin (2020), Cuentas Públicas Participativas. (35) https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2021/05/Cuenta-Publica-SERNAGEOMIN-2020.pdf

[2] Curi, A., Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la descontaminación de efluentes Mineros. *Información tecnológica*, *17*(6), 111-118.

[3] Juan Ocaranza (2000-2019), Anuario de Estadísticas del cobre y otros minerales. (86). Cochilco.

[4] Constanza Romero, (2017). Diseño de planta de extracción por solventes (6). Universidad de Chile. Facultad de Físicas y Matemáticas.

[5] Alsimel (2021). Procesos Metalúrgicos Industriales. http://www.alsimet.es/es/noticias/procesos-metalurgicos-industriales-pirometalurgia-hidrometalurgia-y-electrometalurgia

[6] Curi, A., Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la descontaminación de efluentes Mineros. *Información tecnológica*, *17*(6), 111-118.

[7] Álvarez, H. J. D. (2016). Maestría en Ciencias Agrícolas Mención Sistemas Agroecológicos y Sostenibles de producción.

[8] Estupiñan, A., Sarmiento, D., & de GAlvis, A. M. B. (1998). Remoción de cobre y níquel por intercambio catiónico con una Zeolita Natural. *Revista Colombiana de Química*, *27*(1), 31-39.

[9] Rodríguez Díaz, J. M., Prieto García, J. O., Villegas Aguilar, P. J., Curbelo Sánchez, A., Bucki Wasserman, B., & Mollineda Trujillo, Á. (2004). Zeolita sódica como intercambiador de iones plomo (II). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, *8*.

[10] Coelho, Fabián y Zita, Ana (revisora) "Conocimiento científico". En: *Significados.com*. Disponible en: https://www.significados.com/conocimiento-cientifico/

[11] Correa. E (2019). Transformando un pasivo ambiental en un activo económico y social. Minera Valle Central. https://mineravallecentral.cl/que-hacemos/#planta-de-cascadas

[12] Empírica, (2020). Reutilización de relaves. https://empiricaconsultores.cl/topico-7-reutilizacion-de-relaves-recuperacion-de-cobalto-desde-relaves/

[13] N. Campilla Seva (2011-2012). Introducción al análisis químico. Grado Bioquímica, (4-5).

[14] Martínez, D., Gil Novoa, O. D., & Barón González, A. J. (2006). ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. *Revista colombiana de Física*, *38*(2).

[15] González, E., Ahumada, R., Medina, V., Neira, J., & González, U. (2004). Espectrofotometría de absorción atómica con tubo en la llama: aplicación en la determinación total de cadmio, *Química Nova*, *27*(6), 873-877.

ANEXOS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Centro de Minería PUCV

INFORME
RESULTADOS
ANÁLISIS
N° CM-AQ-RC-023-19
Fecha: 20/11/2019

Cliente: Claudia Venegas

Cargo: Particular

Tipo de muestra: Sólida

Fecha de ingreso: 16-09-2019

Método: Ataque químico

Análisis: Absorción atómica

Equipo: PinAAcle 900T

Resultados Análisis			
Identificación muestra	**Metal**	**ppm**	**%**
Muestra 1	Cu Total	466	0,0466
Muestra 2	Cu Total	486	0,0486
Muestra 3	Cu Total	956	0,0956

Observaciones:

Realizado por: Karina Monsalve Stange
Francis Villarroel Aguilera

Centro de Minería PUCV

Materiales para la recuperación en el laboratorio:

Fuente: Vaso de precipitado. (2021). [fotografía].
https://www.shutterstock.com/es/search/vaso+de+precipitados

Figura 1 Vaso precipitado

Fuente: Vidrio reloj. (2021). [fotografía]. https://www.borolab.cl/producto/vidrio-reloj-120-mm-o/

Figura 2 Vidrio reloj

Fuente: Probeta. (2021). [fotografía]. https://www.instrumentodelaboratorio.info/probeta/

Figura 3 Probeta

Fuente: Matraz Erlenmeyer. (2021). [fotografía]. https://www.amazon.es/CHQYY-Laboratorio-Aislamiento-Transparente-Suministros/dp/B07Y88VJB5

Figura 4 Matraz Erlenmeyer

Fuente: Embudo Buchner. (2015). [fotografía]. https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/embudo-buchner.html

Figura 5 Embudo Buchner

Fuente: Papel filtro. (2021). [fotografía]. https://reactivosyequipos.com.mx/producto/papel-filtro-predoblado-x500/3613

Figura 6 Papel Filtro

Fuente: Laboratorio de Metalurgia UTFSM.

Figura 7 Cloruro de sodio

Fuente: Fuente: Laboratorio de Metalurgia UTFSM.

Figura 8 Bomba de vacío