



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LIXIVIACIÓN**  
**PARA EL LABORATORIO DE MINERALOGÍA EN LA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTORES:**

**ARIAS COELLO JEFFERSON GONZALO**

**ORMAZA GARCÍA DIEGO JOSÉ**

Riobamba - Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LIXIVIACIÓN**  
**PARA EL LABORATORIO DE MINERALOGÍA EN LA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTORES:** ARIAS COELLO JEFFERSON GONZALO  
ORMAZA GARCÍA DIEGO JOSÉ

**DIRECTOR:** Ing. SEGUNDO HUGO CALDERÓN MSc.

Riobamba - Ecuador

2023

**©2023, Arias Coello Jefferson Gonzalo & Ormaza García Diego José**

Se autoriza la reproducción parcial o total, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de autor.

Nosotros, Jefferson Gonzalo Arias Coello y Diego José Ormaza García, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de octubre de 2023



**Jefferson Gonzalo Arias Coello**

**C.I. 0604597781**



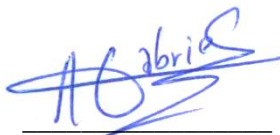


**Diego José Ormaza García**

**C.I. 2300539745**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LIXIVIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE MINERALOGÍA EN LA FACULTAD DE CIENCIAS**, realizado por los señores: **JEFFERSON GONZALO ARIAS COELLO** y **DIEGO JOSÉ ORMAZA GARCÍA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Camilo Pavel Haro Barroso, MSc. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-10-24
Ing. Segundo Hugo Calderón, MSc. <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-10-24
Abg. Ana Gabriela Reinoso Espinoza, MSc. <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-10-24

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación va dedicado a mis amados padres, familia y amigos quienes a lo largo de los años han sido mi pilar fundamental para alcanzar cada uno de mis objetivos, aportando en mi vida consejos y guías de preparación para cada una de mis metas, me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

Jefferson

Dedico con profundo cariño este proyecto de integración curricular a mis padres, ya que, gracias a sus esfuerzos, he logrado completar mis estudios. Muchos de mis logros son atribuibles a ellos, quienes me guiaron con reglas y brindaron ciertas libertades en mi formación. Agradezco a todas las personas cercanas que me respaldaron a lo largo de este proceso. Su apoyo ha sido invaluable.

Diego

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca desistir. Son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos. Un agradecimiento especial a la Dra. Gabriela Morales por motivarme a seguir adelante en cada etapa de mi vida estudiantil, sin sus consejos y cariño entregado hacia mí, nada de esto hubiera sido posible.

Jefferson

Expreso mi gratitud a la vida por brindarme la oportunidad de existir en este mundo y disfrutar de la compañía de mi familia. Agradezco a Dios por permitirme vivir una experiencia académica tan enriquecedora en mi universidad, ya cada docente por guiarme en mi camino para convertirme en un profesional apasionado. A mi familia, un agradecimiento especial por su apoyo constante en cada decisión que tomo.

Si bien el trayecto no ha sido fácil, sus contribuciones, generosidad y respaldo han aligerado la dificultad para alcanzar esta meta. Les estoy agradecido y quiero expresar mi profundo afecto hacia ustedes.

Diego

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Beneficiarios.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1. Directos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2. Indirectos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Localización del proyecto.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.1. Objetivo general.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>5</b>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Antecedentes de investigación.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Referencias teóricas.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1. Hidrometalurgia.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1.1. Extracción de metales por hidrometalurgia.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.1.2. Preparación de los minerales o conminución .....</b>	<b>9</b>



<b>2.2.2. Trituración</b> .....	10
2.2.2.1. <i>Trituración Primaria</i> .....	11
2.2.2.2. <i>Trituración Secundaria</i> .....	13
2.2.2.3. <i>Trituración Terciaria</i> .....	14
<b>2.2.3. Molienda</b> .....	15
2.2.3.1. <i>Etapas de Molienda</i> .....	15
2.2.3.2. <i>Molinos</i> .....	16
<b>2.2.4. Almacenamiento de minerales</b> .....	17
<b>2.2.5. Operaciones Químicas y físicas en el proceso de extracción de metales</b> .....	19
2.2.5.1. <i>Flotación o concentración de metales</i> .....	19
2.2.5.2. <i>Lixiviación</i> .....	20
2.2.5.3. <i>Purificación y/o refinación</i> .....	21
2.2.5.4. <i>Precipitación</i> .....	22
<b>2.2.6. Lixiviación</b> .....	23
2.2.6.1. <i>Factores de los que depende la lixiviación de los metales</i> .....	23
2.2.6.2. <i>Métodos de Lixiviación</i> .....	25
2.2.6.3. <i>Agentes lixiviantes</i> .....	30
2.2.6.4. <i>Características que debe reunir un agente de lixiviación</i> .....	31
2.2.6.5. <i>Lixiviación de minerales de cobre</i> .....	32
2.2.2.6. <i>Ventajas y desventajas de la lixiviación</i> .....	37
<b>2.2.7. Lixiviación por agitación</b> .....	38
2.2.7.1. <i>Agitación</i> .....	40
2.2.7.2. <i>Tipos de flujo</i> .....	41
2.2.7.3. <i>Aplicación de la agitación en el proceso de producción</i> .....	42
2.2.7.4. <i>Agitadores</i> .....	47
2.2.7.5. <i>Principio Químico</i> .....	49
2.2.7.6. <i>Modelos cinéticos de procesos de lixiviación</i> .....	50
2.2.7.7. <i>Aspectos cinéticos</i> .....	52
<b>2.2.8. Diseño de un tanque de lixiviación</b> .....	52

2.2.8.1.	<i>Materiales de construcción para un tanque de lixiviación</i> .....	53
2.2.8.2.	<i>Metales y aleaciones</i> .....	53

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	57
3.1.	<b>Ingeniería del proyecto</b> .....	57
3.1.1.	<i>Tipo de Estudio</i> .....	57
3.1.2.	<i>Metodología</i> .....	57
3.2.	<b>Planificación de la construcción</b> .....	58
3.2.1.	<i>Alternativas de diseño</i> .....	58
3.2.1.1.	<i>Conjunto de almacenamiento – eje de transmisión</i> .....	58
3.2.1.2.	<i>Sistemas de transmisión</i> .....	59
3.2.1.3.	<i>Acoplamiento</i> .....	59
3.2.2.	<i>Selección de alternativas</i> .....	59
3.2.2.1.	<i>Conjunto tanque de almacenamiento – eje de transmisión.</i> .....	59
3.2.2.2.	<i>Sistema de transmisión</i> .....	60
3.2.2.3.	<i>Acoplamiento</i> .....	60
3.3.	<b>Diseño de componentes</b> .....	60
3.3.1.	<i>Análisis de la materia prima</i> .....	62
3.3.2.	<i>Diseño del tanque</i> .....	62
3.3.2.1.	<i>Cuerpo del tanque (Shell)</i> .....	62
3.3.2.2.	<i>Diseño del agitador</i> .....	68
3.3.2.3.	<i>Altura del agitador</i> .....	70
3.3.2.4.	<i>Altura de la pala</i> .....	70
3.3.2.5.	<i>Largo mínimo de la pala</i> .....	71
3.3.3.	<i>Cálculo de la potencia requerida</i> .....	71
3.4	<b>Diagrama P&amp;ID</b> .....	74
3.5.	<b>Herramientas y máquinas</b> .....	74
3.5.1.	<i>Maquinaria Liviana</i> .....	74

3.5.2.	<i>Maquinaria Pesada</i> .....	75
3.6.	<b>Tareas realizadas por cada componente</b> .....	75
3.6.1.	<i>Agitador</i> .....	75
3.6.2.	<i>Motor</i> .....	76
3.6.3.	<i>Tanque</i> .....	76
3.7.	<b>Validación del equipo</b> .....	76
3.7.1.	Proceso de validación.....	77
3.7.2.	<i>Datos experimentales</i> .....	77
3.7.2.1.	<i>Dosificación de reactivos</i> .....	77
3.7.2.2.	<i>Balance de masa de la recuperación</i> .....	79
3.7.2.3.	<i>Eficiencia del proceso</i> .....	82
3.8.	<b>Porcentaje de extracción de cobre</b> .....	82
3.9.	<i>Técnicas para determinar la calidad del producto final</i> .....	84

#### CAPÍTULO IV

4.	<b>RESULTADOS</b> .....	85
4.1.	<b>Resultados del dimensionamiento del equipo lixiviador</b> .....	85
4.1.1.	<i>Dimensionamiento tanque de agitación</i> .....	85
4.2.	<b>Resultados de la validación del equipo</b> .....	85
4.2.1.	<i>Balance de masa de recuperación</i> .....	86
4.2.2.	<i>Resultado de eficiencia</i> .....	86
4.2.3.	<i>Resultado del % de extracción del cobre</i> .....	86
4.2.4.	<i>Contenido de Cu en muestras</i> .....	86

CONCLUSIONES.....	88
-------------------	----

RECOMENDACIONES.....	89
----------------------	----

#### BIBLIOGRAFÍA

#### ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Localización del Proyecto.....	4
<b>Tabla 2-1:</b>	Tabla comparativa entre distintos métodos de lixiviación .....	30
<b>Tabla 2-2:</b>	Tipos de lixiviantes para algunos minerales comunes.....	32
<b>Tabla 2-3:</b>	Técnicas de lixiviación a nivel industrial .....	33
<b>Tabla 2-4:</b>	Velocidades de disolución de cobre .....	34
<b>Tabla 2-5:</b>	Clasificación más común del acero. ....	54
<b>Tabla 2-6:</b>	Propiedades mecánicas de los aceros estructurales al carbono. ....	54
<b>Tabla 2-7:</b>	Propiedades generales de los aceros inoxidables .....	55
<b>Tabla 2-8:</b>	Tipos de aceros más usados y sus aplicaciones .....	56
<b>Tabla 3-1:</b>	Cuadro comparativo de composición química. ....	63
<b>Tabla 3-2:</b>	Cuadro comparativo de composición química. ....	63
<b>Tabla 3-3:</b>	Escala de agitación en recipientes de almacenamiento. ....	73
<b>Tabla 3-4:</b>	Composición Química del mineral calcopirita mina Portovelo.....	79
<b>Tabla 3-5:</b>	Composición Química del concentrado de Cu .....	80
<b>Tabla 3-6:</b>	Condiciones experimentales .....	83
<b>Tabla 3-7:</b>	Determinación del contenido de Cobre .....	84
<b>Tabla 4-1:</b>	Resultado del dimensionamiento del equipo lixiviador.....	85
<b>Tabla 4-2:</b>	Resultado del balance de masa de la recuperación.....	86
<b>Tabla 4-3:</b>	Eficiencia del proceso y de la celda de flotación.....	86
<b>Tabla 4-4:</b>	Resultado de la cantidad de cobre disuelto.....	86

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-1:</b>	Localización geográfica del laboratorio de mineralogía – ESPOCH.....	5
<b>Ilustración 2-1:</b>	Proceso de hidrometalurgia.....	8
<b>Ilustración 2-2:</b>	Diagrama de los procesos de hidrometalurgia en la obtención de minerales..	8
<b>Ilustración 2-3:</b>	Diagrama de los procesos de hidrometalurgia para la obtención de minerales que no involucran procesos de concentración de metales. ....	9
<b>Ilustración 2-4:</b>	Proceso de trituración .....	11
<b>Ilustración 2-5:</b>	Diagrama Trituradora de mandíbulas .....	12
<b>Ilustración 2-6:</b>	Diagrama Trituradora de giratoria .....	13
<b>Ilustración 2-7:</b>	Diagrama Trituradora de cono .....	14
<b>Ilustración 2-8:</b>	Diagrama Trituradora terciaria – máquina de arena .....	14
<b>Ilustración 2-9:</b>	Proceso de molienda .....	15
<b>Ilustración 2-10:</b>	Diagrama molino de barras.....	16
<b>Ilustración 2-11:</b>	Diagrama molino de bolas .....	17
<b>Ilustración 2-12:</b>	Proceso de flotación.....	19
<b>Ilustración 2-13:</b>	Proceso de lixiviación.....	20
<b>Ilustración 2-14:</b>	Proceso de precipitación. ....	22
<b>Ilustración 2-15:</b>	Variación de la granulometría debido a “chancado químico” .....	24
<b>Ilustración 2-16:</b>	Proceso de lixiviación en bateas. ....	26
<b>Ilustración 2-17:</b>	Proceso de lixiviación en pilas.....	27
<b>Ilustración 2-18:</b>	Proceso de lixiviación in situ. ....	28
<b>Ilustración 2-19:</b>	Proceso de lixiviación por agitación. ....	29
<b>Ilustración 2-20:</b>	Proceso de obtención de cobre por vía hidrometalúrgica .....	33
<b>Ilustración 2-21:</b>	Campos de velocidades en depósito de Agitación - Flujo Axial y Radial. ...	42
<b>Ilustración 2-22:</b>	Homogeneización de dos fluidos. ....	43
<b>Ilustración 2-23:</b>	La agitación permite mantener los sólidos en suspensión. ....	43
<b>Ilustración 2-24:</b>	Dispersión de tres fluidos insolubles. ....	44
<b>Ilustración 2-25:</b>	El gas pasa a través del eje hacia el fluido agitado. ....	45
<b>Ilustración 2-26:</b>	La agitación permite temperaturas homogéneas en todo el estanque. ....	45

<b>Ilustración 2-27:</b> Microorganismos suspendidos a través de la agitación. ....	46
<b>Ilustración 2-28:</b> Cristales suspendidos en el proceso de agitación.....	46
<b>Ilustración 2-29:</b> Adición de hidrógeno a través del eje agitador.....	47
<b>Ilustración 2-30:</b> Esquema general de un agitador. ....	48
<b>Ilustración 2-31:</b> Mecanismo de lixiviación de un mineral.....	50
<b>Ilustración 2-32:</b> Esquema del modelo de conversión progresiva.....	51
<b>Ilustración 2-33:</b> Esquema del modelo de núcleo sin reaccionar .....	52
<b>Ilustración 3-1:</b> Semejanzas geométricas para diversos tipos de impulsores .....	64
<b>Ilustración 3-2:</b> Típicas juntas verticales y horizontales para el cuerpo del tanque. ....	67
<b>Ilustración 3-3:</b> Junta del fondo con las paredes del tanque. ....	68
<b>Ilustración 3-4:</b> Selección del tipo de agitador .....	69
<b>Ilustración 3-5:</b> Modelo de hélice turbina Rushton .....	70
<b>Ilustración 3-6:</b> Esquema de caudales presente en agitadores.....	72
<b>Ilustración 3-7:</b> Tipo de velocidades lineales en agitadores. ....	72
<b>Ilustración 3-8:</b> Diagrama P&D .....	74
<b>Ilustración 3-9:</b> Diagrama del balance de masa de la recuperación de cobre.....	80
<b>Ilustración 3-10:</b> Balance de masa de la recuperación .....	82
<b>Ilustración 4-1:</b> Contenido de cobre en muestras del proceso de lixiviación .....	87

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

**ANEXO B:** ANÁLISIS DE FLUOROSCOPIA DE RAYOS X MINERAL INICIAL

**ANEXO C:** ANÁLISIS DE FLOUROSCOPIA DE RAYOS X DE SOLUCION PREÑADA DE  
CU.

## RESUMEN

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo no se cuenta con un equipo de lixiviación para la extracción hidrometalúrgica, por lo tanto, la planta piloto de obtención de metales existente, no es adecuada para potenciar la calidad de los proyectos de investigación desarrollados por los docentes, investigadores y estudiantes dentro de la facultad, por ello el objetivo del presente trabajo fue diseñar y construir un equipo de lixiviación para el laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. La metodología implementada se enfoca en revisión bibliográfica de equipos aptos para el proceso de lixiviación de metales evaluando las características óptimas para su uso. Posterior a esto se llevó a cabo los cálculos de ingeniería correspondientes, así como la creación de planos y su construcción en acero al carbono A-36 y acero inoxidable A316, presentando un volumen total de 50 lts de los cuales 40, son usados para su funcionamiento con una capacidad máxima de muestra de 5 kg. Mediante esta metodología se logró que la eficiencia del proceso de lixiviación en el equipo sea de 92,23% liberando 448,9 g de Cu en forma de sulfato respecto a los 486,28 g de Cu presentes en el CuO, con un porcentaje de recuperación de Cu del 73,71% lo que significa la recuperación de 448,9 g de Cu en relación a los 609 g de CuO presente en el mineral inicial de calcopirita. En conclusión, debido a las propiedades lixiviantes y a las condiciones del mineral, para que se genere una fuerte separación del material de interés, se debe trabajar al menos al 40% de capacidad. Finalmente, se concluye que el equipo cumple con todos los factores de diseño señalados, pero es recomendable leer los manuales para evitar desperfectos durante su uso y realizar periódicamente un mantenimiento preventivo del equipo.

**Palabras clave:** <LIXIVIACIÓN>, <MINERIA>, <TANQUE DE AGITACIÓN>, <METALES>, <DISEÑO DE EQUIPO>.

1949-DBRA-UPT-2023






## ABSTRACT

The Escuela Superior Politécnica of Chimborazo does not have a leaching equipment for the hydrometallurgical extraction therefore, the existing pilot plant for obtaining metals is not adequate to enhance the quality of the research projects developed by teachers, researchers and students within the faculty. The objective of the present work was to design and build a leaching equipment for the mineralogy laboratory of the Faculty of Sciences of the ESPOCH. The methodology implemented focuses on a bibliographic review of equipment suitable for the leaching process of metals, evaluating the optimal characteristics for its use. Subsequently, the corresponding engineering calculations were carried out, as well as the creation of drawings and its construction in carbon steel A-36 and stainless steel A316, presenting a total volume of 50 liters of which 40 liters are used for its operation with a maximum sample capacity of 5 kg. Through this methodology, the efficiency of the leaching process in the equipment was 92.23%, releasing 448.9 g of Cu. in the form of sulfate as compared to the 486.28 g of Cu. present in the CuO, with a Cu recovery percentage of 73.71%, which means the recovery of 448.9 g of Cu as compared to the 609 g of CuO present in the initial chalcopyrite ore. In conclusion, due to the leaching properties and the conditions of the ore, in order to generate a strong separation of the material of interest, it is necessary to work at least at 40% capacity. Finally, it is concluded that the equipment complies with all the design factors indicated, but it is advisable to read the manuals to avoid damage during its use and to periodically perform preventive maintenance on the equipment.

**Key words:** <LEACHING>, <MINING>, <AGITATION TANK>, <METALS>, <EQUIPMENT DESIGN>.



---

Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

C.I. 1103696132

## INTRODUCCIÓN

Desde un principio de la vida el ser humano ha creado herramientas y a medida que se da la globalización, también aumenta la necesidad de crear artefactos y procesos que mejoren y faciliten el desarrollo de la vida humana y su nivel de calidad, por lo que, la mejora continua actualmente juega un papel indispensable. La revolución industrial planteó como pensamiento principal que, para la producción de un producto o un bien, era preciso utilizar el 90% de mano de obra y acompañado por el correcto funcionamiento de las máquinas. Sin embargo, el pensamiento actual plantea un giro contrario, en donde para la generación de un producto o servicio, la maquinaria es la encargada de generar en promedio el 90% del producto o servicio final (Pardo, 2021, p.4).

De acuerdo con la OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental) reconoce al proceso de lixiviación en minería como aquel en el que se añaden ciertos agregados al mineral con el propósito de alcanzar una sustancia líquida rica. En otros casos, puede ser llamada como extracción sólido-líquida, gracias a que se emplea agua, u otro disolvente, que atraviesa el suelo con el objetivo de que uno o más componentes (solubles) del sólido se disuelvan, siendo que un proyecto se torne económico de acuerdo a que se trabajen mayores volúmenes de material (HLCSISTEMAS, 2020, párr.1).

La lixiviación es un proceso que se utiliza para la obtención de metales útiles y preciosos a partir de materiales de menor valor, como lo es el ácido sulfúrico. Es un proceso que frecuentemente antecede de un tratamiento previo, como la tostación por sulfatado. Normalmente la lixiviación requiere de condiciones específicas como son altas presiones, altas temperaturas, alta concentración de oxígeno, inclusive puede ser necesario la utilización de electricidad. Una vez generada la solución lixiviada, es necesario procesos de recolección del metal esperado o su compuesto, entre los más utilizados está la precipitación o reducción de metales, como, por ejemplo, para la producción de cobalto o níquel se realiza la reducción hecha con gas (McCann, 2019, pp.82.2-82.3).

Es importante recalcar la importancia que estos temas representan en la educación de un ingeniero químico, ya que, permite interrelacionar el conocimiento académico de cada estudiante con el ámbito práctico de la mineralogía, aportando a la formación de los estudiantes, creando un avance en la parte socio económica de Ecuador y principalmente en el desarrollo de la minería.

Por las razones antes mencionadas el actual Trabajo de Integración Curricular se orienta en el diseño y construcción de un equipo de lixiviación para el laboratorio de mineralogía, aplicando

conceptos de hidrometalurgia claves a menor escala, reforzando los aspectos teóricos y aportando conocimientos prácticos los futuros profesionales de ingeniería química.

Dentro del laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, el contar con una planta piloto de recuperación de metales, y dentro de esta, contar con un equipo para el proceso de lixiviación de metales permitirá potenciar la calidad de los proyectos de investigación desarrollados por los docentes investigadores dentro de la facultad, en el campo de la metalurgia y la extracción de metales. A la par esto incrementará la cantidad de proyectos desarrollados por los docentes que vinculen al laboratorio y así incrementar la capacidad de servicios educativos que el laboratorio de mineralogía preste a la comunidad educativa dentro de la ESPOCH. Finalmente, la puesta en marcha de un tanque de lixiviación dentro del laboratorio buscará integrar una red interdisciplinaria entre carreras y facultades para evaluar el impacto e implicación técnica, económica y financiera en la recuperación de metales a través de procesos hidrometalúrgicos como la lixiviación. (Delvasto, 2013, p. 5).

# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad la minería es un campo de alto impacto en el Ecuador que constituye un elemento base en la mayoría de las industrias donde se utiliza el proceso de lixiviación para la obtención de un metal. El objetivo del proceso es extraer las partes solubles del mineral pulverizado al lavarlo con soluciones químicas, permitiendo la separación de estos minerales. La lixiviación dentro de la mineralogía se puede encontrar en minas, yacimientos, entre otras fuentes de adquisición de minerales (Estupiñan, et al., 2021, p. 537).

En consecuencia, a la información detallada y al conocimiento que adquieren los estudiantes, de las operaciones de extracción de minerales, se necesita complementar el aprendizaje por medio de ensayos de laboratorio y análisis físicos químicos; por lo tanto, se necesita un equipo de extracción hidrometalúrgica. Lo que actualmente en el laboratorio de biorremediación de la Facultad de Ciencias, no dispone de este equipo relacionado con el proceso de lixiviación; en consecuencia, no se realiza prácticas, investigaciones y estudios relacionados con esta operación.

### 1.2. Justificación

La lixiviación es un proceso metalúrgico donde se realiza la extracción solido-liquido de un mineral, siendo una operación unitaria utilizada y considerada como el más importante para la recuperación de un metal por medio de un lavado de agua o sustancia químicas para separar el metal valioso de los no valiosos (Kenny, 2014, p. 11).

Por la falta de equipos relacionados con el proceso de extracción de minerales, se justifica enteramente realizar el diseño y construcción de un equipo de lixiviación, que tendrá un funcionamiento óptimo y eficiente; de tal manera que beneficiará a las futuras generaciones de estudiantes de las diferentes carreras para fortalecer el conocimiento práctico, mediante la utilización y observación del funcionamiento del equipo de lixiviado y logren llevar a cabo futuros estudios e investigaciones.

### 1.3. Beneficiarios

#### 1.3.1. Directos

El presente proyecto de Integración Curricular mantiene como beneficiarios directos a toda la comunidad de la Escuela de Ingeniería Química perteneciente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ya que, contribuirá a la adquisición de conocimientos de Metalurgia y Procesos Extractivos, asimismo, mediante la interrelación de cátedras como Operaciones Unitarias, se generara conocimiento práctico creando una sujeción con la ingeniería, optimizando las destrezas en el manejo de los equipos en el Laboratorio, debido a que existe ausencia de equipos.

#### 1.3.2. Indirectos

Toda aquella comunidad de otras carreras de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que requiera del uso del equipo desarrollado para cierto proceso de extracción. Al estar disponible para toda la comunidad académica, se beneficiará la creación de vínculos interinstitucionales.

### 1.4. Localización del proyecto

El presente proyecto tecnológico se va a implementar en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, específicamente en el laboratorio de Mineralogía de la carrera de Ingeniería Química.

**Tabla 1-1:** Localización del Proyecto

LÍMITES ESPOCH	Norte: limita con el barrio 24 de mayo y la Av. Canónigo Ramos. Sur: limita con la Av. Pedro Vicente Maldonado y el Barrio de los Maestros. Este: limita con la Av. 11 de Noviembre. Oeste: limita con la Av. Monseñor Leónidas Proaño.
RANGO ALTITUDINAL	Está ubicada a 2754 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar)
Localizaciones coordenadas	Utm 17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m S
Localizaciones coordenadas geográficas	78°40'35.24" de longitud occidental y a 1°39'29.58" de latitud sur
CLIMA	Temperatura promedio de 20 °C

**Fuente:** (Instituto Nacional de Estadística y censos, 2018).



**Ilustración 1-1:** Localización geográfica del laboratorio de mineralogía – ESPOCH

**Fuente:** (Adaptado de Google Earth, 2022)

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Diseñar y construir un equipo de lixiviación para el laboratorio de mineralogía en la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Superior de Chimborazo.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Realizar los cálculos de ingeniería mediante el dimensionamiento físico y mecánico para el equipo de lixiviación.
- Construir el equipo con materiales adecuados en base al diseño ingenieril.
- Validar experimentalmente la eficiencia del equipo mediante la obtención de un metal caracterizando sus propiedades en el laboratorio.
- Elaborar el manual técnico y guía de práctica de laboratorio para el manejo correspondiente del equipo.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

De acuerdo con Rodríguez B. (2018), el estudio de lixiviación de minerales a escala de laboratorio debe considerar tres aspectos principales: implementación de protocolos existentes para cada metal a obtener, estudio de la cinética de lixiviación y su variación que ocurre de acuerdo con la granulometría o tamaño de partícula del mineral, el tipo de lixiviantes utilizados, y la determinación de los cinética de reacción de la lixiviación con sus respectivos parámetros para poder utilizar a gran escala o escala industrial.

Romero, A & Flores, S. (2010), exponen en su trabajo que la obtención de metales (oro, plata y cobre) a partir de su mineral contenedor requiere un medio acuoso, donde la disolución de estos metales es recuperada mediante el uso de una solución básica o alcalina que forma aniones complejos de oro, plata o cobre, según el mineral, estables en soluciones líquidas.

La obtención de metales como el cobre utiliza un proceso de lixiviación, en escala de laboratorio en medio acuoso requiere que el tamaño de partícula del mineral no supere los 75mm de diámetro, esto favorece la agitación del medio y reduce el tiempo de reacción. Además, se puede confirmar que la presencia de iones cloruro (Cl<sup>-</sup>) genera una disolución de cobre mucho más rápida (Montes, 2013, p.32).

Para Richardson (2007), el mejor método de lixiviación de minerales para la obtención de cobre consiste en la utilización de reactores agitados, los cuales permiten un mayor control de la agitación y de la temperatura, aunque conlleva un incremento de inversión, reduce tiempos de operación, pero además se debe considerar que este proceso sólo se utiliza cuando el porcentaje de cobre presente en el mineral es alto.

La posibilidad de obtener cobre a partir de sulfuros de cobre es posible mediante la aplicación de lixiviación, en este caso se requiere una reacción redox ya que, se necesita un agente lixivante que induzca una oxidación electroquímica en el mineral (Domie, 2001, p.2). Para los procesos de lixiviación es muy importante prestar atención a los agentes lixiviantes que se usarán, puesto que el uso de lixiviantes inorgánicos determinará la presencia de impurezas no deseadas y considerables daños ambientales, mientras que el uso de lixiviantes orgánicos muestra una leve reducción de eficiencia (Dutra et al., 2006, p.3)

Según Aghemio, A. (2013) el uso de ácido tricarbólico ( $C_6H_8O_7$ ) en combinación con agua presenta una solución a los problemas presentados por el uso de lixiviantes convencionales, obteniendo un citrato de cobre que no afecta a los metales ya que no es corrosivo. El uso de este ácido permite recuperar el agua utilizada durante el proceso y reduce costos de implementación. Dentro del proceso de lixiviación, Uno de los aspectos más importantes es la concentración del agente lixivante, Kim et al. (2016) y Yang et al. (2017), evaluaron diferentes concentraciones de lixiviantes para la recuperación de metales, a partir de desechos, y encontraron que mayores concentraciones de lixiviantes aumentaban la concentración y el porcentaje de metales y viceversa.

Rodríguez (2003) afirmó que el tamaño de partícula de una mineral afecta la cantidad de lixivante a utilizar, es decir, si la granulometría es menor, se requiere mayor cantidad de lixiviantes. Esto ocurre ya que el área superficial del mineral es mayor y pese a que el tamaño de partícula es menor, el área de contacto de la solución lixivante con la superficie mineral aumenta, proporcionando una mejor cinética y un mayor porcentaje de recuperación de metal. Los costos de inversión para la obtención de metales a partir de procesos de lixiviación tienen una relación inversamente proporcional con la concentración del metal, de acuerdo con Cáceres y Joly (2007), para lograr una alta concentración del metal en la disolución de lixiviación, la concentración del metal debe ser lo más alta posible

## **2.2. Referencias teóricas**

### **2.2.1. Hidrometalurgia**

Comprende los procesos extractivos que se realizan para la obtención de metales utilizando soluciones acuosas, o en estado líquido, las mismas que pueden ser orgánicas o inorgánicas. Estos procesos necesitan un medio acuoso y temperaturas bajas para obtener un mejor resultado, estos métodos de extracción permiten conseguir metales y o compuestos metálicos desde sus minerales o provenientes de material de reciclaje. Las ventajas de los procesos hidrometalúrgicos son:

- Posibilidad de control automático
- Es un proceso muy selectivo
- Son procesos que conllevan un menor impacto ambiental
- Necesitan bajos costos de inversión
- En algunos casos, permiten un ahorro de combustible



- Flexibilidad para realizar combinaciones entre operaciones unitarias y encontrar procesos eficientes y óptimos.

### 2.2.1.1. Extracción de metales por hidrometalurgia

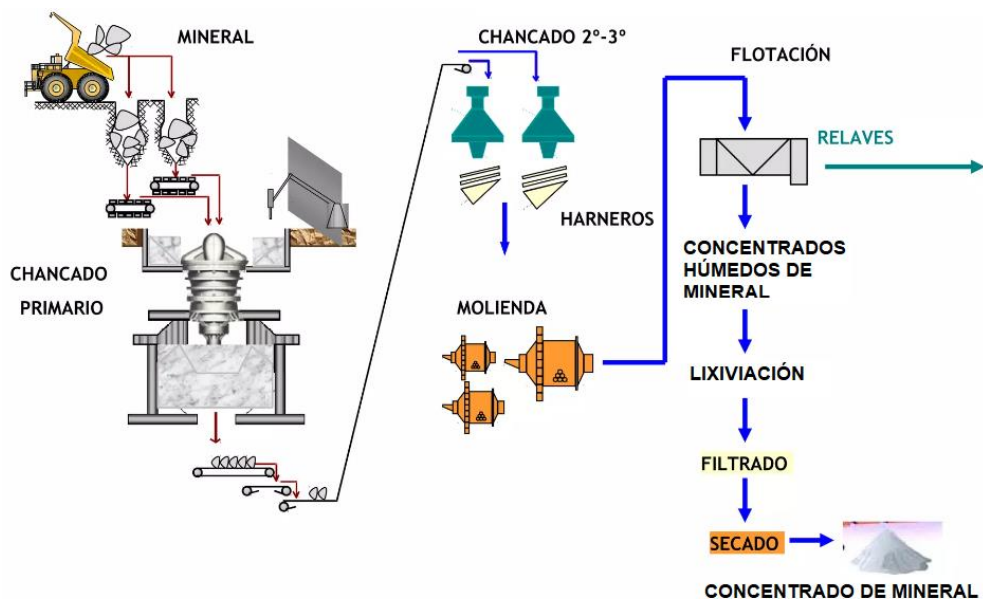
El esquema de la extracción de metales por hidrometalurgia, en forma simplificada sigue el siguiente proceso:



**Ilustración 2-1:** Proceso de hidrometalurgia

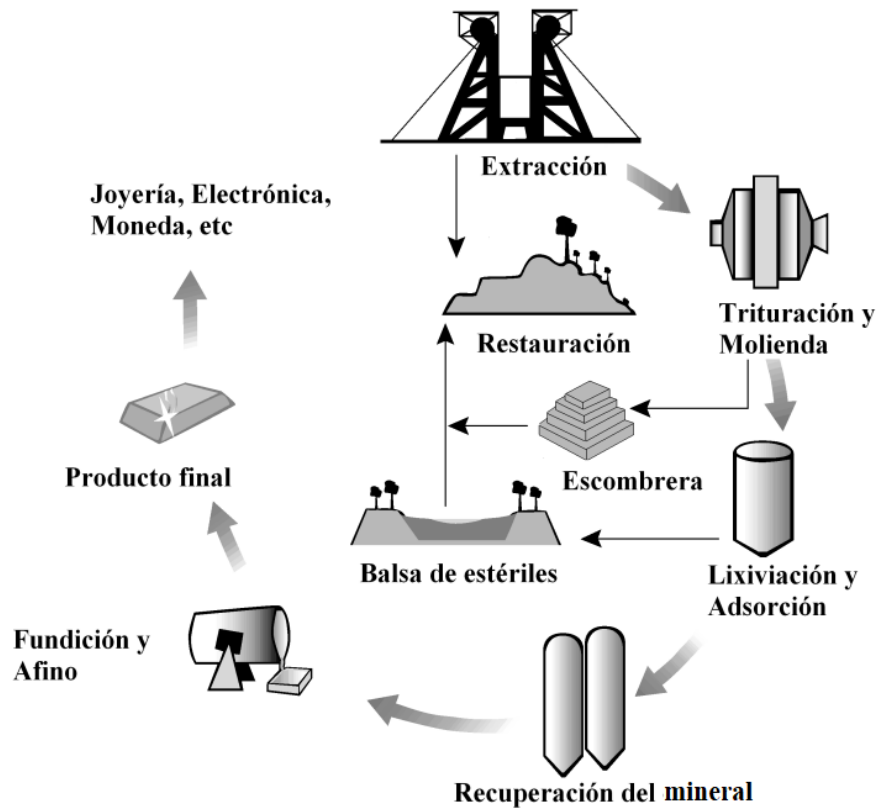
Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

Como se visualiza, los procesos de extracción a partir de métodos hidrometalúrgicos inician con la obtención de las materias primas ya sean minerales o productos reciclados. Estas materias primas deben ser tratadas previamente con procesos de reducción de tamaño como la trituración o chancado y molienda, procesos de selección o concentración como la flotación o procesos pirometalúrgicos como la tostación y fusión. Finalmente, se realiza el proceso de extracción del mineral de interés, utilizando solventes inorgánicos u orgánicos en la lixiviación, seguido de la recolección del material a partir de la precipitación o deposición del metal (Van Arsdale, et al, 1965, p.54),



**Ilustración 2-2:** Diagrama de los procesos de hidrometalurgia para la obtención de minerales

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023



**Ilustración 2-3:** Diagrama de los procesos de hidrometalurgia para la obtención de minerales que no involucran procesos de concentración de metales.

Fuente: Álvarez García, 2005.

### 2.2.1.2. Preparación de los minerales o conminución

A continuación, se detallan las principales operaciones de preparación de los minerales, las cuales deben ser realizadas previo a la disolución por solventes. Las principales operaciones son:

- Trituración y molienda

Estos dos procesos llamados conminución tienen como objetivo disminuir el tamaño de los minerales para su mejor procesamiento, la trituración requiere disminuir el tamaño del mineral considerando el tamaño inicial de la materia prima. En algunos casos el tipo de mineral viene en tamaños similares o mayores a 50 cm de diámetro promedio y considerando que para poder procesar el mineral dentro del proceso de molienda es necesario alcanzar tamaños de partículas entre las 2" y 4" de diámetro, la trituración se vuelve un proceso indispensable.

Para el caso de la molienda, los procesos pueden desarrollarse como procesos húmedos y secos, dependiendo el grado de molienda que se desea alcanzar, la granulometría inicial del material y

la eficiencia final del equipo en el que se trabajará. La molienda como procesos de preparación del mineral es indispensable para alcanzar los tamaños de partículas óptimos para continuar con los procesos hidrometalúrgicos de flotación o lixiviación. (Espinosa de León, L., & López Aburto, V., p.55-58).

- Tamaños de Partículas

Tanto el mineral o roca extraído de cantera como el que a sufrió una o más etapas de reducción, se puede clasificar de acuerdo con su tamaño. En general, se clasifican de la siguiente forma:

**Material grueso:** trozos de un tamaño mayor a 75 cm (30").

**Material mediano:** trozos de un tamaño de 10 a 75 cm (4" a 30").

**Material fino:** trozos de un tamaño menor a 10 cm (4")

Por otra parte, según el tamaño que tienen las partículas a la salida de las máquinas de desintegración, se pueden distinguir las distintas etapas de trituración y molienda. Seguidamente se detallan las mismas:

a) Trituración (desintegración grosera)

Trituración gruesa – tamaños de partículas de salida: 15 cm (6").

Trituración mediana – tamaños de partículas de salida: entre 3 y 15 cm (1¼" a 6").

Trituración fina – tamaños de partículas de salida: entre 0.5 y 3 cm (1 / 5" a 1¼").

b) Molienda (desintegración fina)

Molienda grosera – tamaños de partículas de salida: entre 0.1 y 0.3 mm.

Molienda fina – tamaños de partículas de salida: menores de 0.1 mm.

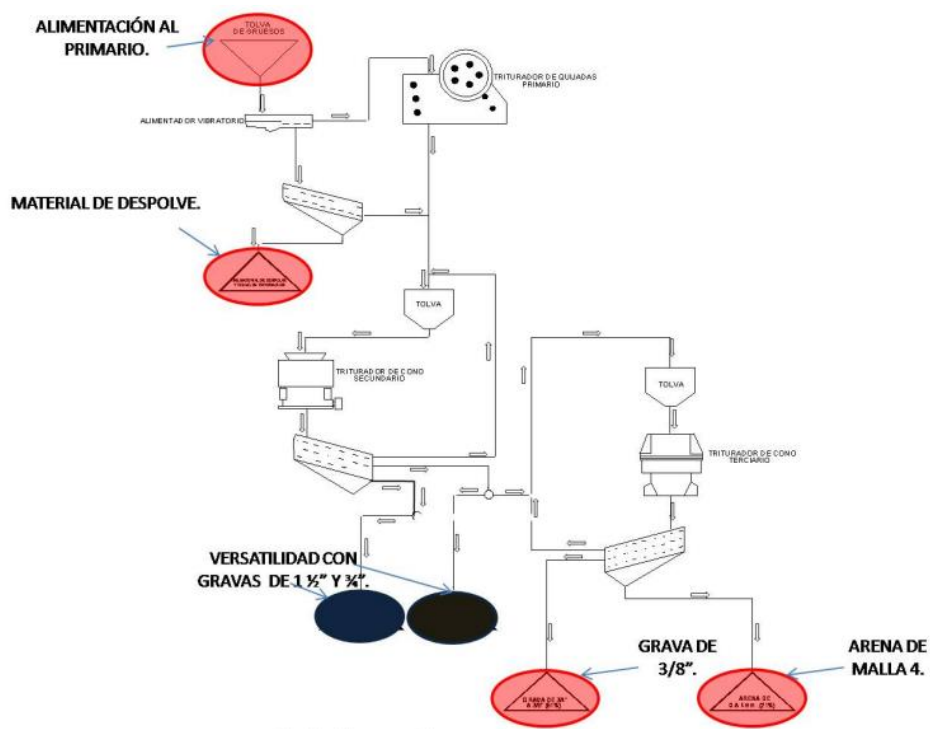
La trituración grosera, mediana y fina corresponden, prácticamente, a la primera, segunda y tercera etapa de trituración; mientras que la molienda grosera y fina corresponden a las etapas primaria y secundaria de la molienda. (Cépeda J. 2016, pp.12-15).

### 2.2.2. Trituración

Para el tratamiento industrial de rocas y minerales, es necesario practicar una preparación de estos y dentro de esa preparación normalmente se requiere efectuar una reducción de tamaño. Las operaciones mediante las que se efectúan dichas reducciones de tamaño por medios físicos se denominan trituración y molienda, estas operaciones se realizan con el objeto de facilitar el transporte de los materiales, las operaciones físicas (tales como mezclado, dosificación,

aglomeración o disolución) y facilitar o permitir las reacciones químicas (como consecuencia de que la velocidad de reacción es función de la superficie de las partículas y es tanto más grande cuanto mayor es su grado de subdivisión).

Si bien no existe una diferencia clara entre la trituración y la molienda, en general se habla de trituración cuando se fragmentan partículas de tamaños superiores a 1 pulgada (1") y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1" (1" =2.54 cm). La trituración es también denominada desintegración y las maquinas que la producen se conocen según diversos autores como trituradoras, desintegradoras, quebrantadoras o machacadoras. (Espinoza de León, L., & López Aburto, V. M., p.60-62).



**Ilustración 2-4:** Proceso de trituración

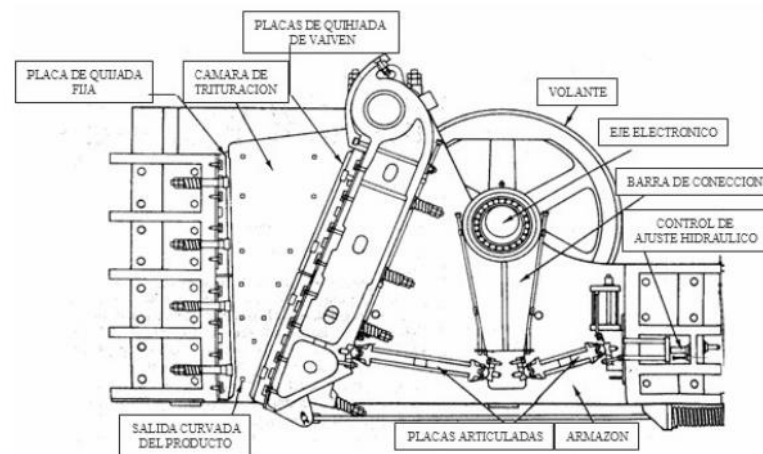
Fuente: Ptolomeo UNAM, 2021.

### 2.2.2.1. Trituración Primaria

La trituración primaria recibe, normalmente, el todo-uno o mineral bruto de la explotación minera y realiza la primera reducción de tamaño. Los equipos utilizan preferentemente las fuerzas de compresión y las de impacto o percusión. Los equipos se deben caracterizar por la dimensión del tamaño que admiten, por su robustez y por la capacidad para admitir o rechazar elementos o componentes no deseados mediante los sistemas apropiados.

En toda operación de reducción de tamaño va a existir un roce, más o menos notable, dependiendo del tipo de fuerza aplicada y de la forma en que se aplica, diseño del equipo, entre el material a fragmentar y ciertas partes del equipamiento. Dado el carácter normalmente abrasivo de las sustancias minerales, va a producirse un desgaste de partes más o menos vitales de los equipos mineros de fragmentación. Los equipos característicos para la realización de este trabajo son de tres tipos, caracterizados por la forma en que aplican la fuerza necesaria para la fragmentación.

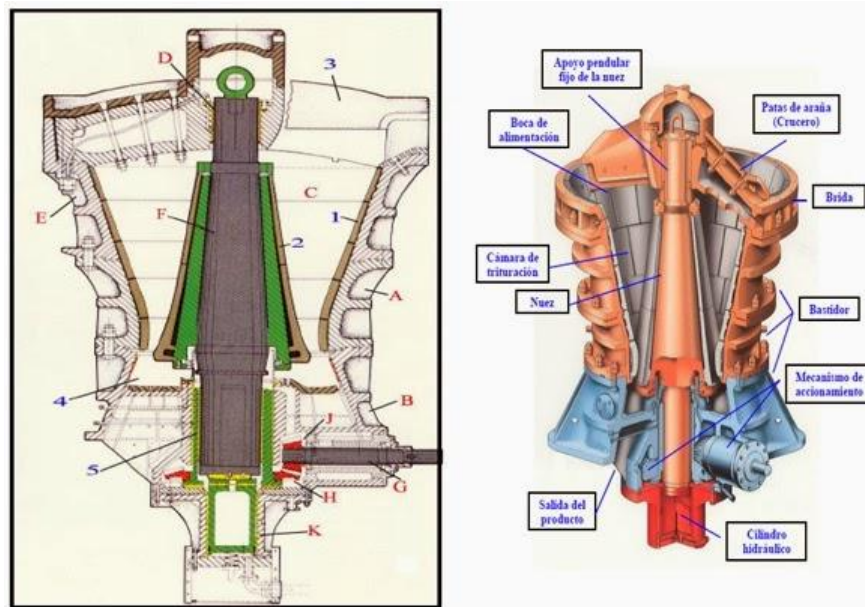
- a) Quebrantadoras, machacadoras o trituradoras de mandíbulas. Estos equipos utilizan como fuerza predominante la compresión y la aplican de forma discontinua por atrapamiento entre dos mandíbulas, una fija y otra móvil mediante diferentes sistemas de actuación. Pueden ser de simple o de doble efecto, denominación que se corresponde con la traducción del inglés de single toggle (teja, palanca o placa de articulación) o double toggle (doble palanca).



**Ilustración 2-5:** Diagrama Trituradora de mandíbulas

**Fuente:** Iguarán Salinas, 2008.

- b) Trituradoras giratorias. Utilizan el mismo principio que las de mandíbulas, pero lo aplican de forma giratoria por lo que parece que el proceso, aun siendo discontinuo, tiene la apariencia de continuo. En el efecto de giro el material situado en un punto es comprimido y fragmentado entre la nuez (ó cabeza) y el cóncavo y pasado el instante de presión es liberado. El efecto desde el punto de vista exterior al equipo es de un funcionamiento continuo.



**Ilustración 2-6:** Diagrama Trituradora de giratoria

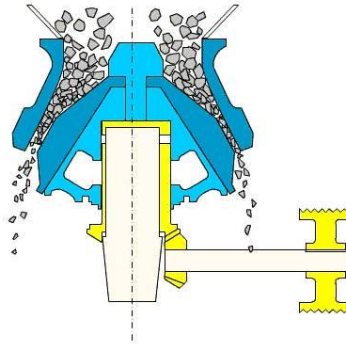
**Fuente:** Iguarán Salinas, 2008.

- c) Otros equipos, trituradores de choque, de impacto y de percusión. Utilizan la energía del impacto, la fuerza de compresión o el cizallamiento según la tecnología empleada. (Cépeda J. 2016, pp.20-25).

#### 2.2.2.2. Trituración Secundaria

En la trituración secundaria, el tamaño del mineral se reduce a un valor comprendido entre 3" y 2", dejándolo en condiciones de poder pasar a la concentración preliminar. Las quebradoras utilizadas en esta fase son por lo general de tipo giratorio o cónico. Estas quebradoras a diferencia de las primarias trabajan a velocidades relativamente altas (aproximadamente 500 r.p.m.) y su abertura de salida de los productos triturados es mucho menor.

- a) Quebradora giratoria. Las quebradoras giratorias son similares a las utilizadas para la trituración primaria, pero de menor tamaño, a objeto de producir un tamaño adecuado de producto y constan de una masa trituradora de forma cónica que gira en el interior de una carcasa fija, abierta por su parte superior e inferior.
- b) Quebradoras cónicas. La quebradora cónica, es una quebradora giratoria modificada. La diferencia principal es que el eje y cono triturador no están suspendidos del spider cap, sino que están soportados por un descanso universal ubicado por debajo. (Espinosa de León, L., & López Aburto, V. M., p.60-62).



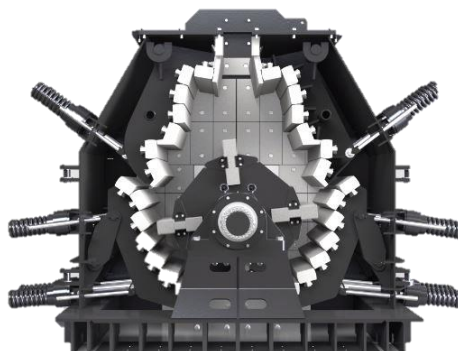
**Ilustración 2-7:** Diagrama Trituradora de cono

**Fuente:** Iguarán Salinas, 2008.

### 2.2.2.3. Trituración Terciaria

Aquí se fragmenta el producto de la trituración secundaria hasta tamaños entre 1/2 y 3/8 de pulgada. No siempre es utilizada, generalmente es reemplazada por la etapa de molienda. Se encuentran maquinas como trituradoras giratorias y cónicas. Para la trituración terciaria generalmente se utiliza un equipo conocido como máquina de arena, debido a ofrecer un área de trabajo para piezas más pequeñas. En plantas de trituración existentes se prefieren especialmente los productos que han regresado de la trituradora Secundaria o no se ha obtenido el rendimiento deseado como resultado del paso por la criba vibratoria.

La trituradora terciaria puede operar a ciertos rendimientos dependiendo del tipo de piedra o mina. Usted puede encontrar trituradoras con potencia de motor de 160 kW y 250 kW, que en el mercado se presentan como 700 rpm o 1000 rpm (Cépeda J. 2016, pp. 25-28).

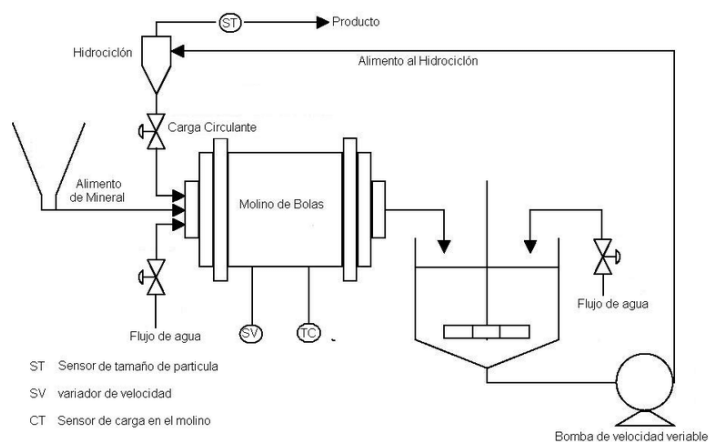


**Ilustración 2-8:** Diagrama Trituradora terciaria – máquina de arena

**Fuente:** Iguarán Salinas, 2008.

### 2.2.3. Molienda

La molienda es un proceso mecánico para reducir el tamaño de partículas sólidas en un dispositivo llamado molino. Es una operación unitaria aplicada a muestras sólidas que permite reducir el volumen promedio de las partículas presentes. La molienda generalmente se refiere al procesamiento de partículas de menos de 1 cm, y el grado de pulverización es mayor que la trituración. La reducción se realiza rompiendo mecánicamente el mineral y clasificando la muestra al tamaño deseado. Los métodos de trituración y molienda más comunes utilizados en la respectiva maquinaria son la compresión, el impacto, la rotación por cizallamiento y el cortado. (Espinosa de León, L., & López Aburto, V. M., 1984. p.55-58).



**Ilustración 2-9:** Proceso de molienda

**Fuente:** Ptolomeo UNAM, 2021.

#### 2.2.3.1. Etapas de Molienda

Según las etapas de reducción de tamaño, usan los siguientes equipos:

**Molienda Primaria:** Seguido a etapa de chancado. Molinos de “cascado”, medios de molienda generalmente barras. Operan en circuito abierto, sin clasificadores intermedios.

**Molienda Secundaria y Terciaria:** Seguido de la molienda primaria, Medios de molienda generalmente bolas y molinos verticales para molienda fina y ultrafina. Operan en circuito cerrado con clasificación. (Espinoza de León, L., & López Aburto, V. M., 1984. p.58-60).

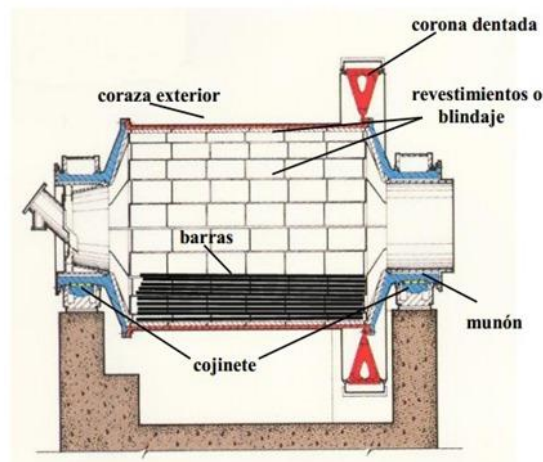


### 2.2.3.2. Molinos

Según su aplicación y el tipo de medios de molienda empleados, podemos definir los molinos más importantes de la siguiente manera:

- Molinos de barras

Generalmente empleados para molienda primaria, algo como etapa intermedia entre chancado y molienda (por ejemplo: cuando la presencia de arcilla o panizo en el mineral dificulta el chancado fino). Se caracterizan por una razón largo/diámetro del cilindro mayor de 1.5:1. Por las limitaciones mecánicas en el largo de las barras, existen limitaciones en la dimensión y la capacidad de este tipo de molinos, que recientemente comienza a perder preferencia. (Cépeda J. 2016, pp. 25-28).



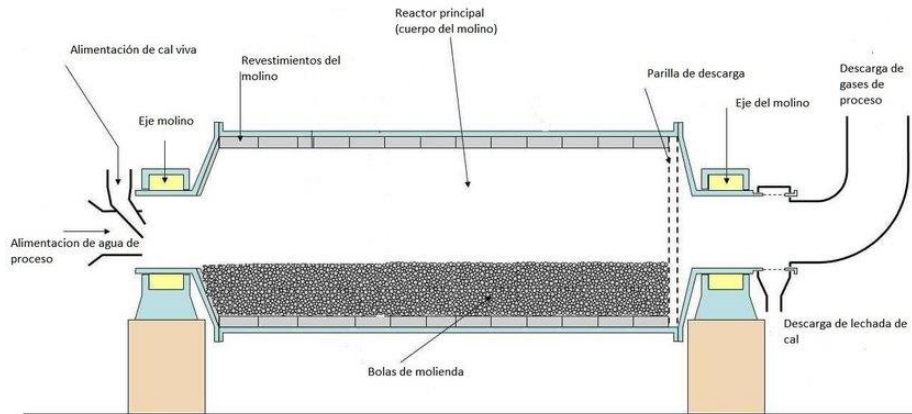
**Ilustración 2-10:** Diagrama molino de barras

**Fuente:** Ptolomeo UNAM, 2021.

- Molinos de bolas

Operan con bolas de hierro (o aleaciones antiabrasivas especiales) fundido o acero forjado, con razones de largo/día, 1.5:1 o menos. El diámetro de bolas usadas varía entre 4" para molienda gruesa y 3/4" para molienda fina y remolienda de concentrados u otros productos intermedios. Estos pueden ser utilizados como molinos de molienda primaria, secundaria y remolienda. Los molinos de bolas para molienda primaria son de forma cilíndrica y de gran tamaño y en su interior la carga moledora o bolas también son de gran diámetro (3-4 1/2"), ocupan el 45% del volumen del molino y trabajan en circuito abierto.

En el caso de molinos de bolas de molienda secundaria y de remolienda por lo general son de forma tubular, es decir, su diámetro es ligeramente menos que su largo y trabajan en circuito cerrado con clasificadores mecánicos (rastrillos, espirales) o hidrociclones para maximizar su rendimiento y para evitar sobremolienda que es perjudicial para la concentración.



**Ilustración 2-11:** Diagrama molino de bolas

**Fuente:** Ptolomeo UNAM, 2021.

#### 2.2.4. Almacenamiento de minerales

El almacenamiento o acopio de mineral es una parte importante desde el punto económico como de planificación, debido a que corresponde a la unión de la mina con la planta, este proceso debe permitir que la obtención de metales sea productiva, rentable y óptima para obtener el máximo beneficio económico.

El almacenamiento o acopio de mineral corresponde al lugar físico donde es acumulado mineral extraído de la mina y en muchos casos después de una reducción de tamaño. Este almacenamiento puede ser abierto o cerrado, dependiendo de las condiciones climáticas de las zonas en las que se encuentran los procesos de extracción metalúrgica.

La elección de la técnica o sistema apropiado se determina en función de diversos factores tales como las clases de material, cantidad de mineral, granulometría, factores locales e incluso factores ambientales.

1. **Almacenamiento Cerrado:** consiste en utilizar métodos de almacenamiento confinado como silos, tolvas y contenedores, para evitar en lo posible la formación de polvo debido al viento a través de medidas primarias. La elección del sistema de almacenamiento cerrado depende

especialmente de factores climáticos, del grado de pulvulencia, de los costos por pérdidas de material, los costos de constructibilidad, el espacio disponible.

**Hangares:** Denominados tejados, suelen ser una estructura techada con paredes laterales cuyas aperturas permiten la fluida entrada y salida de camiones y personal

**Galpones:** Estructuras más cerradas con accesos controlados en los cuales se requiere de un sistema de ventilación.

Tanto los galpones como los galpones tienen mecanismos parecidos donde el material ingresa a través de correas, apiladoras longitudinales, camiones o poleas. En cuanto a la salida del material es a través de camiones y palas o a través de tolvas provistas con cintas transportadoras.

**Domos:** Estructuras cerradas utilizadas en el sector minero para cumplir una serie de funciones que van desde el cuidado del medio ambiente hasta tareas de bodegaje. Los domos se emplean para encapsular acopios de materiales metalúrgicos de cualquier tipo, tamaño y forma.

**Silos y tolvas:** Los silos son estructuras para el almacenamiento de volúmenes medios de materiales, con gran capacidad de almacenamiento en poca superficie. Los silos son depósitos principalmente cilíndricos, algunos de ellos con una base de descarga de forma cónica. Las tolvas, son estructuras más pequeñas, consideradas de almacenamiento intermedio que a menudo son rectangulares, con una zona de descarga en forma piramidal. El tiempo de permanencia de los productos sólidos en estos contenedores suele ser muy breve.

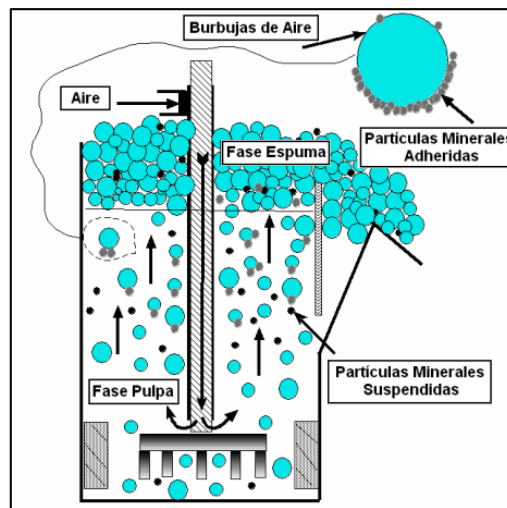
2. **Almacenamiento abierto:** corresponde al depósito del material a la interperie para someterlo a operaciones de clasificación, mezcla y otras.

**Stockpiles:** Es acopio en pilas, esta técnica es una forma económica y segura de almacenar grandes cantidades de mineral chancado ya sea grueso y/o fina. La capacidad de almacenamiento de este acopio puede alcanzar varias toneladas dependiendo de la geometría y el diseño. El principal objetivo de este acopio es proveer una capacidad pulmón entre la mina y la planta, y asegurar un flujo de alimentación continuo, uniforme y controlado a los equipos. (Bugueño R.,2015. p. 2-4).

## 2.2.5. Operaciones Químicas y físicas en el proceso de extracción de metales

### 2.2.5.1. Flotación o concentración de metales.

Su objetivo principal es separar la mayor cantidad posible de metales y materiales de desecho, es decir, separar la ganga de los minerales o la mena. La operación más utilizada para el enriquecimiento es la flotación. El procesamiento o enriquecimiento del metal es el siguiente paso después de la trituración y está diseñado para establecer condiciones en el mineral durante la extracción que permitan la extracción de metales valiosos. Además de la homogeneización del volumen del mineral, el proceso de separación de la fracción valiosa (metal) de la fracción no valiosa (residuos o impurezas) para obtener una fracción concentrada o enriquecida que contiene la mayoría de los minerales de interés. Residuos que contienen principalmente materiales estériles.



**Ilustración 2-12:** Proceso de flotación

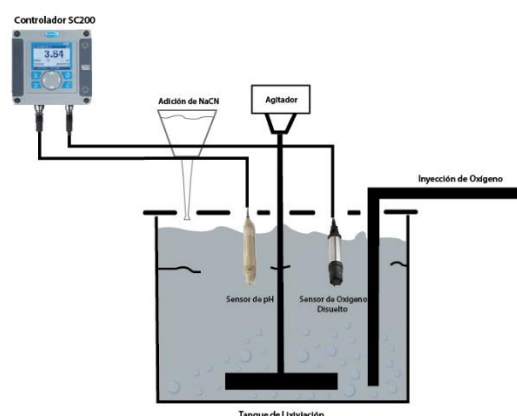
**Fuente:** Codelco Educa, 2020.

La concentración o beneficio de metales reduce en gran medida la cantidad de material que debe procesar la planta, reduciendo así la cantidad de energía utilizada y la cantidad de reactivos necesarios para producir metal puro en el procesamiento posterior. El objetivo de cualquier proceso de concentración de minerales es obtener el concentrado metálico de la más alta calidad, el mayor valor y el menor costo posible. La recuperación de metales valiosos debe ser lo más alta posible y la eliminación de materiales no valorizados debe ser lo más alta posible. Las etapas de enriquecimiento mineral están bien definidas por la química mineral y se clasifican principalmente por las concentraciones de óxido y sulfuro. (Valdivieso, A. L., & Bahena, J. L. R., 2005. p. 2-4).

En el proceso de flotación están involucradas un gran número de variables, cada una de ellas incide en una determinada forma dentro del proceso, es por esto que hay que buscar un equilibrio entre todas ellas para así lograr resultados óptimos tanto metalúrgicamente como económicamente. Diversos investigadores reportan que una de las variables que tiene mayor impacto en el proceso de flotación es el tamaño de particular del mineral. La eficiencia de la flotación en celdas convencionales disminuye cuando el tamaño de partícula es menor a  $38\mu\text{m}$ . Para los procesos de extracción de cobre se trabaja con un tamaño de partícula menor a  $38\mu\text{m}$ . pero mayor a  $250\mu\text{m}$ . Regularmente se busca un equilibrio entre la recuperación total de cobre, los beneficios y los costes que genera todo el proceso de concentración. La granulometría del cobre infliere directamente con el porcentaje d recuperación total del metal ya que al disminuir el diámetro de las partículas se aumenta la liberación del metal de interés encapsulado en el mineral y en el material estéril pero a su vez aumenta la cantidad de finos, lo que conlleva un decaimiento en la recuperación, debido a la imposibilidad de que estas partículas puedan adherirse a las burbujas durante la flotación. (López et al., 2018. p. 1-2).

#### 2.2.5.2. Lixiviación

Es una operación en la que se da un ataque químico en una fase acuosa, del metal en estudio contenido en su matriz o mena minera. La lixiviación puede ser ácida, básica o neutra, esto depende del carácter del reactivo químico utilizado (Suero, 2018, p.12). En la metalurgia extractiva, el proceso de extraer las especies de interés de un mineral utilizando agentes que disuelven el mineral o lo convierten en una sal soluble se denomina lixiviación. En otras palabras, durante la lixiviación, la sustancia activa se recupera de la fase líquida correspondiente a la sustancia o su sal en solución acuosa. Generalmente, los minerales lixiviados son minerales menos oxidados (óxidos, carbonatos, sulfatos, silicatos, etc.).



**Ilustración 2-13:** Proceso de lixiviación

**Fuente:** Codelco Educa, 2020.

La lixiviación es un método ampliamente utilizado en la metalurgia extractiva que convierte los metales en sales solubles en un medio acuoso. La lixiviación es más fácil y menos destructiva que las operaciones pirometalúrgicas porque no se producen contaminantes gaseosos. Sus principales desventajas son la alta acidez del trabajo, que en algunos casos produce efluentes residuales tóxicos, y la baja eficiencia debida a la baja temperatura de trabajo, que afecta en gran medida la velocidad de las reacciones químicas. El mineral utilizado en el proceso de lixiviación puede ser oxidado o sulfurado. (Cárdenas et. al., 2010, p.2)

#### *2.2.5.3. Purificación y/o refinación*

Es una operación que continúa inmediatamente después de la lixiviación, su objetivo es retirar impurezas que pudiesen estar presentes antes de continuar con la siguiente etapa. Los metales obtenidos en procesos de extracción primaria suelen contener impurezas de minerales, fundentes o combustibles. Para utilizar estos metales es necesario someterlos a uno o más procesos de purificación.

La operación unitaria de la refinación plantea dos objetivos principales, el primero es producir un metal tan puro como sea posible, mientras el otro es producir productos con niveles controlados de impurezas de acuerdo con especificaciones. Finalmente, también puede ser aplicada para recuperar impurezas que debido a que son inofensivas se convierten en valiosas en sí mismas, como la recuperación de plata del mineral de plomo. El proceso de refinado siempre se basa en la dispersión diferencial de diferentes elementos entre diferentes fases y el principio de que estas fases pueden separarse por medios físicos.

Es importante destacar que el proceso de purificación de minerales no es más que la separación de mezclas. Hay muchos procesos de purificación que involucran conceptos físicos y químicos muy complejos. En general, los procesos se pueden dividir en dos categorías:

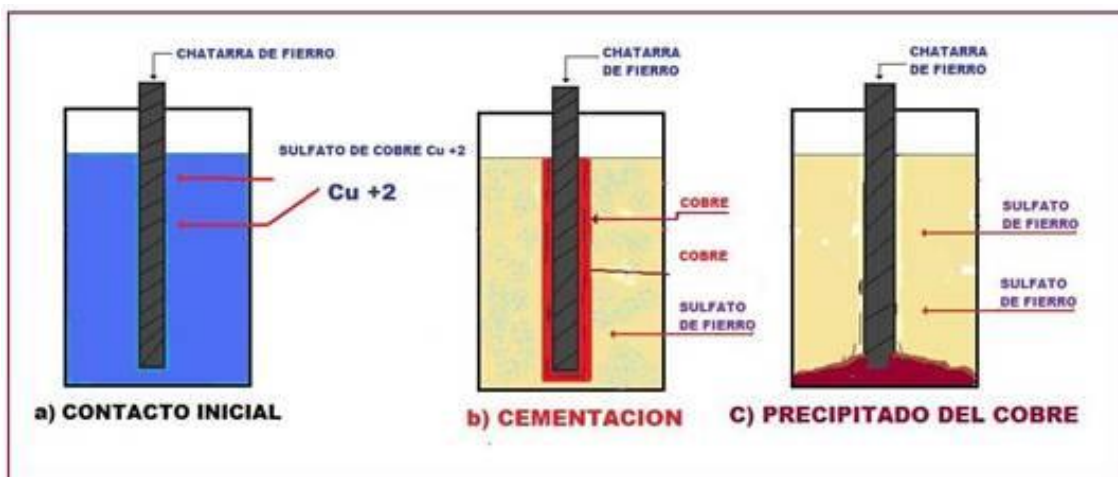
**Escoria - metal:** un proceso importante aquí es la oxidación y la eliminación de la escoria de los elementos menos nobles, este proceso puede denominarse pirorefinación ya que es un proceso de refinación a altas temperatura, Ejemplos de estos procesos son la fabricación de acero y el refinado de cobre y plomo.

**Metal - metal:** Este proceso se encuentra la licuación y la refinación por zonas. Produce metales de la más alta pureza. (Ceresetto et al, 2020, p. 112-116).

#### 2.2.5.4. Precipitación

El objetivo de este proceso es separar el metal de la solución, en un mayor porcentaje en estado elemental y raras veces en su forma oxidada, y se suele utilizar los siguientes métodos: electrólisis (como es el caso del cobre) o cementación.

La precipitación es el proceso por el cual un soluto se vuelve insoluble ya sea a través de una reacción química o alterando la composición del solvente para reducir la solubilidad de la sustancia. Los sólidos precipitados se pueden aislar mediante sedimentación y/o filtración. La sedimentación se usa comúnmente para eliminar el calcio y el magnesio para reducir la dureza del agua. Durante la precipitación, se agrega un precipitado químico al metal en la solución acuosa y se produce en un recipiente de reacción agitado.



**Ilustración 2-14:** Proceso de precipitación.

**Fuente:** Codelco Educa, 2020.

Los metales disueltos se vuelven insolubles debido a las reacciones químicas entre los compuestos metálicos solubles y los precipitados. La suspensión obtenida se separa por decantación en un tanque de sedimentación. La coagulación se puede realizar para mejorar la capacidad de separar la materia suspendida. La selección de reactivos es la primera consideración en la precipitación de metales pesados. Una segunda consideración es la solubilidad, ya que la cantidad de precipitado depende del producto de solubilidad del compuesto no deseado (el metal que se separa). La solubilidad también es un factor importante en este tipo de reacción, ya que la solubilidad se ve afectada por la temperatura. (Parga, J. R., & Carrillo, F. R. 1996. p.2).

### **2.2.6. Lixiviación**

Es un proceso que consiste en la separación de sustancias o compuestos conocidos como solutos, los cuales son parte de una solución, que generalmente se encuentra en estado sólido, mediante el uso de disolventes líquidos. En otras palabras, el proceso de lixiviación consiste en la extracción de un material sólido, a partir de una extracción sólido líquido. (Pávez, 2020, p.13).

#### **2.2.6.1. Factores de los que depende la lixiviación de los metales**

Tamaño de partículas o granulometría

Concentración del mineral

Temperatura

Velocidad de Reacción

- Granulometría

Las partículas más grandes requieren menos solución de lixiviación dependiendo del área con la que estén en contacto. Cuanto mayor sea el tamaño de partícula del sólido, más lentamente penetrará la solución en el mineral y disolverá el metal. Por otro lado, si el tamaño de partícula es pequeño, se requiere más agente lixivante porque a mayor área superficial, menor tamaño de partícula y mayor contacto entre el filtrado y los sólidos, lo que resulta en una mayor recuperación. Metal (Rodríguez, 2003, p.3).

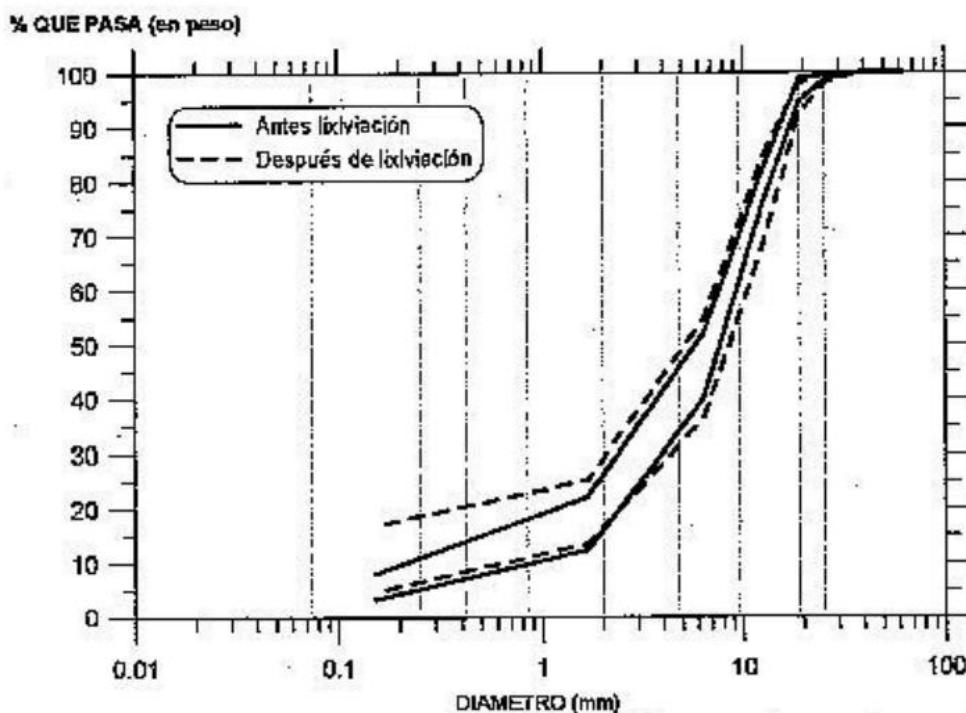
Por esta razón, el procesamiento a partir de residuos sólidos reduce el tamaño de las partículas, lo que resulta en muestras con mayor homogeneidad y una mejor extracción de los metales deseados; sin embargo, el lodo de galvanoplastia a menudo se encuentra en un estado semisólido, por lo que no es necesario analizar el tamaño de las partículas sólidas a menos que se haya realizado un proceso de secado inicialmente. Para que un mineral sea considerado para el proceso de lixiviación requiere de un tamaño óptimo, generalmente se utiliza un tamaño de partícula fina porque así los minerales muestran una mayor superficie a los reactivos lixiviantes, modificando de manera favorable la velocidad de disolución (Portal Minero, 2006, p. .4).

Para el caso de la lixiviación de minerales de cobre normalmente la granulometría es “seleccionada” por las distintas pruebas metalúrgicas que se realizan. Su elección comienza con una selección basada en la experiencia del metalurgista, quien toma en cuenta las características físicoquímicas del mineral. Cabe notar que siempre un menor tamaño de partículas dará mejores resultados en la recuperación de cobre, sin embargo, la disminución de tamaño tiene como



consecuencia una disminución de la permeabilidad, lo que puede causar problemas operacionales debido a inundaciones, problemas de estabilidad mecánica estática y sísmica, e incluso la imposibilidad de que la solución se infiltre a través de la pila. Además, al disminuir el tamaño, si bien se mejora la recuperación de cobre, también se aumentan los costos por chancado.

También es necesario aclarar que desde el punto de vista metalúrgico no interesa cuantificar el material más fino que malla#100, y además, en algunos casos esta caracterización granulométrica se efectúa por tamizado en seco. Otro aspecto de importancia es la posibilidad de que al penetrar las soluciones por las microfisuras de las partículas más finas, se produzca un “chancado químico”. La siguiente figura presenta la granulometría de minerales antes y después de la lixiviación, observándose que por efecto del chancado químico puede producirse una variación en la fracción de arenas y finos. Debe tenerse en cuenta que el chancado químico ocurrirá en los minerales en mayor o menor cantidad, dependiendo de la ley del mineral y de los componentes de la ganga (conjunto de minerales que no contiene el metal a explotar), ya que algunos de ellos también podrían lixivarse. Se espera que mientras mayor sea la ley del mineral, y la ganga presente mayor cantidad de minerales lixiviables, mayor será el chancado químico. (Portal Minero, 2006, p. 6-10).



**Ilustración 2-15:** Variación de la granulometría debido a “chancado químico”

Fuente: Bard & Campaña, 2004.

- **Concentración de Mineral**

Jha et al. (2012) y de la Torre, Guevara y Espinoza (2013) afirman que las concentraciones de minerales se pueden estimar de dos maneras. Considerando la densidad del sólido o de la pulpa, en ambos casos este valor debe ser lo más alto posible para lograr una alta concentración de iones metálicos en el proceso de lixiviación, justificando así los costos de inversión ya que se reducen al mínimo. En consecuencia, los estudios de recuperación de estaño y zinc han demostrado que cuanto mayor es la densidad de sólidos o lodos, mayor es el porcentaje de metal extraíble recuperado. Este estudio arrojó una tasa de recuperación de más del 86%.

- **Temperatura**

La temperatura es una variable importante en el proceso de lixiviación. Esto se debe a que las temperaturas más altas significan tasas de filtración más altas y una mayor recuperación en menos tiempo. De hecho, la temperatura está directamente relacionada con la cinética del proceso según la ecuación de Arrhenius. Además, al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad de la arcilla y aumenta el contacto entre el lixiviado y el mineral (Rodríguez, 2003, p.3). Según autores como Kim et al. (2016) y Yang et al. (2017), cuanto mayor sea la temperatura a la que se ejecuta el proceso, mayor será la recuperación de metal.

- **Velocidad de Reacción**

La velocidad de agitación debe ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos en suspensión sin sedimentarse. Esto es beneficioso para la cinética de extracción. Sin embargo, esto favorece la velocidad de minería. Sin embargo, los costos de operación aumentan debido al mayor consumo de energía (Cáceres y Joly, 2007). Algunos autores mantuvieron una velocidad de agitación constante entre 300 y 750 rpm en todas las pruebas realizadas. (Molina, 2018, p.43).

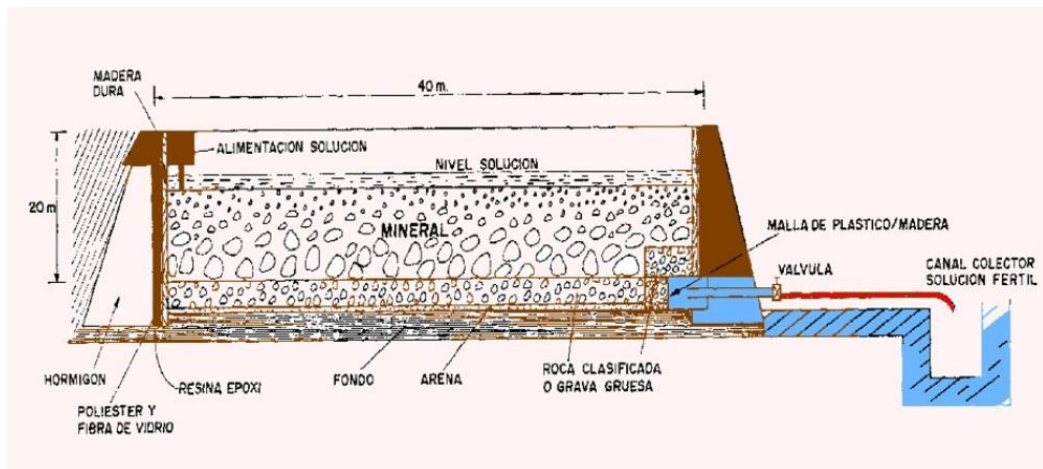
#### ***2.2.6.2. Métodos de Lixiviación***

Los métodos más utilizados son:

- ***Lixiviación en bateas***

Conocida como lixiviación de tanque agitado, en el cual, el lixivante tiene contacto directo con el metal en tanques o recipientes grandes que poseen un sistema apropiado para proveer

movimiento y gracias a esto aumenta la cinética de la reacción. En este caso el sólido contenedor del metal generalmente debe reducir su tamaño previo al proceso de lixiviación.



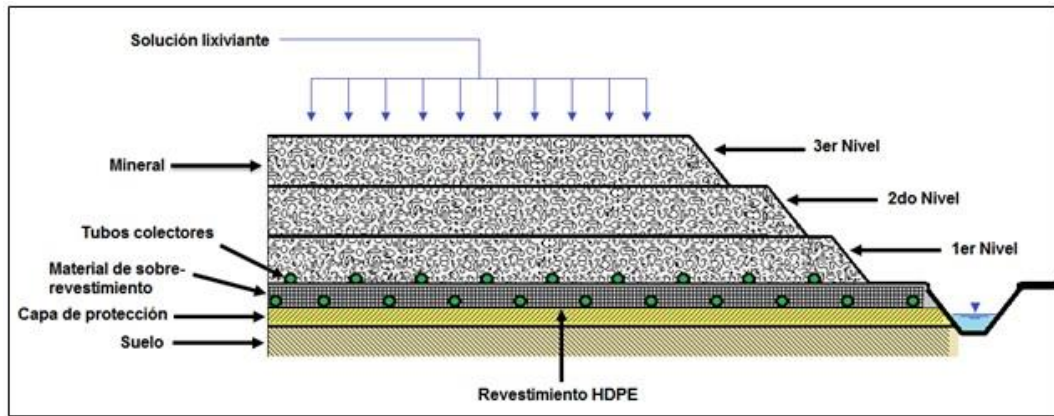
**Ilustración 2-16:** Proceso de lixiviación en bateas.

**Fuente:** Codelco Educa, 2020.

El nombre del método indica que los minerales están contenidos en los contenedores de charolas o bateas, por lo que la lixiviación sería la acumulación de minerales en las mismas o el equivalente a piletas de concreto o tapas removibles donde hay una solución lixivante. Esta operación puede trabajar con material de diverso tamaño de partículas. (Cárdenas et. al., 2010, p.3)

- *Lixiviación en pila*

En la filtración a granel, el mineral se recolecta y apila en recipientes revestidos con revestimientos impermeables. A continuación, se recoge y se prepara para su posterior procesamiento. Este proceso generalmente se usa para minerales de baja ley que son muy costosos de procesar. Las pilas de filtros se utilizan con porcentajes de eficiencia más altos para extraer oro, plata, cobre, níquel y uranio.



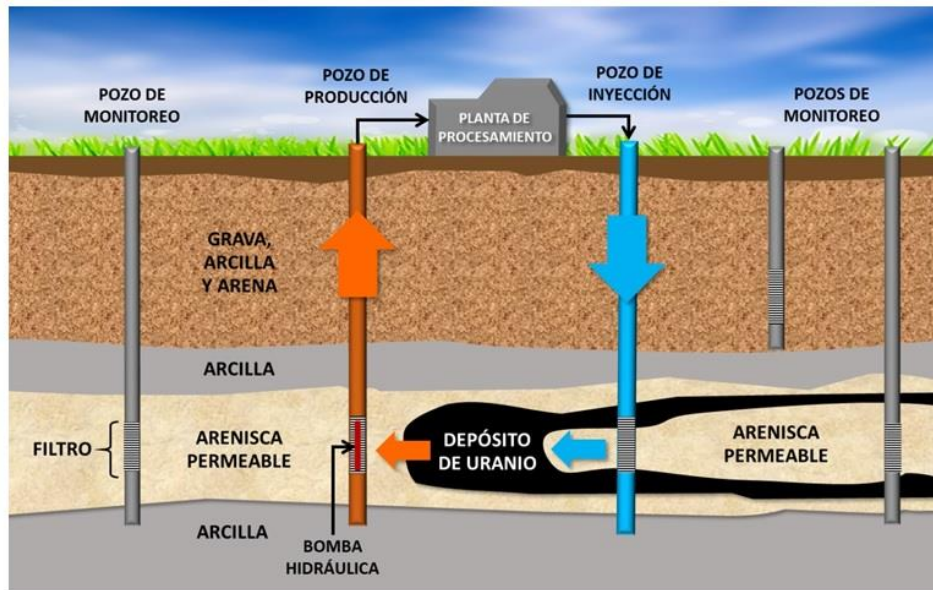
**Ilustración 2-17:** Proceso de lixiviación en pilas.

**Fuente:** Codelco Educa, 2020

La lixiviación y el apilamiento se refieren al proceso metalúrgico de extracción de minerales forzando soluciones a través de pilas. El agente lixivante reacciona químicamente con el mineral para disolver los minerales y separarlos de la roca mineral, creando una solución "rica". Después de atravesar la pila, la solución se recolecta y transporta a una planta de procesamiento, donde se extraen los metales preciosos de la solución. Esta solución "ligera" se acondiciona químicamente y se devuelve a la parte superior del montículo para otro ciclo. La lixiviación se ha utilizado durante siglos como una forma económica de extraer metales preciosos de los minerales- En los tiempos modernos, las técnicas de filtración se usan comúnmente para recuperar varios minerales industriales como cobre, oro, uranio y yodo. (Cárdenas et. al., 2010, p.4)

- *Lixiviación in situ*

Este método consiste en crear hoyos o pozos en la mina para una mejor filtración osmótica, la filtración se bombea para trabajar de manera más efectiva con los minerales, y la solución resultante se recolecta y procesa. Reducir los costos económicos de la extracción de minerales de baja calidad y reducir el impacto ambiental asociado son dos áreas que la industria minera debe abordar. Una de las soluciones propuestas a estas necesidades es una técnica de extracción in situ que pueda ser procesada en almacenamiento mediante filtración del material.



**Ilustración 2-18:** Proceso de lixiviación in situ.

**Fuente:** Codelco Educa, 2020.

La lixiviación in situ (ISL) elimina los minerales de la roca mediante la inyección de soluciones químicas en el cuerpo del mineral. Luego, el líquido resultante se bombea a la superficie donde se recupera el metal. Los expertos describen la solución como un modelo integrado que combina procesos de minería tradicionales con LIS. Esto se debe a que está estrechamente relacionado con las primeras etapas de la perforación y voladura de rocas, donde los minerales están más fragmentados y procesados por filtración. (Cárdenas et. al., 2010, p.5)

- *Lixiviación en autoclave*

Este proceso utiliza alta temperatura y presión para aumentar la velocidad de reacción. Este es un método agresivo comúnmente usado para minerales y concentrados que no son aptos para la filtración convencional, como los sulfuros. (EMEW, 2021, párrafo 6). En los últimos años, se han desarrollado varios métodos para la lixiviación de minerales sulfurados en autoclaves a temperaturas superiores a 100°C y a altas presiones y concentraciones de oxígeno. La ventaja es que condiciones tales como alta presión y temperatura son más favorables para el equilibrio y, lo que es más importante, para un tiempo o velocidad de reacción más rápidos.

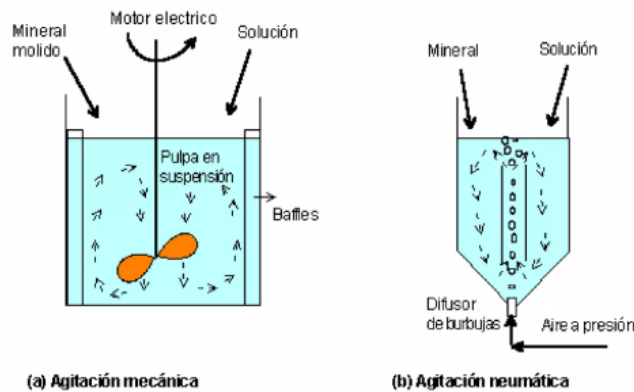
La disolución se acelera al aumentar la temperatura y la presión, especialmente cuando la disolución se acelera por la presencia de una fase gaseosa. Este proceso sirve para muchos propósitos. Su objetivo principal es aumentar la tasa de disolución de todos los valores en el lixiviado, aumentar la tasa de disolución de sólidos y, en el mejor de los casos, solo una disolución lenta en el lixiviado. Presión atmosférica. Las autoclaves utilizadas en procesos de filtración a

presión pueden operar a temperaturas más altas que con tanques abiertos, lo que mejora las tasas de disolución. Los reactivos como el oxígeno suelen ser críticos para una disolución rápida.

El proceso de filtración depende de la presión del gas dentro del autoclave cuando se disuelven grandes cantidades de mineral. Las sustancias relativamente insolubles en condiciones normales de tanques abiertos como el sulfuro son solubles si se puede mantener la temperatura, como eliminar la tostada como antes. El proceso de filtración se puede realizar con una solución de ácido o amoníaco. Esto es particularmente adecuado para la disolución de cobalto, níquel y cobre en la solución. (Mamani, 2018, p.35).

- *Lixiviación por agitación.*

Es uno de los métodos más utilizados, especialmente para minerales de oro de alta ley, y adicional permite trabajar con concentrados de flotación. En este método de lixiviación, se aumenta el área de contacto entre el agente lixiviante y la superficie del metal debido a que los minerales están finamente molidos. Este método se utiliza para extraer minerales de alto valor comercial como cobre, oro, plata, etc. El objetivo de esta actividad es lograr una mayor tasa de recuperación en un menor tiempo (Dominique, 2001, p. 38). La lixiviación por agitación se puede dar de las siguientes maneras:



**Ilustración 2-19:** Proceso de lixiviación por agitación.

Fuente: Codelco Educa, 2020.

- *Comparación entre métodos de lixiviación*

El siguiente cuadro muestra una comparación entre los distintos tipos de lixiviación presentados, definir un proceso óptimo depende del metal que se desea obtener, las condiciones de la planta, y principalmente el beneficio económico que se va a obtener.

**Tabla 2-1:** Tabla comparativa entre distintos métodos de lixiviación

Rangos de Aplicación y resultados	Métodos de Lixiviación			
	En Bateas	En Pilas	In situ	Agitación
<b>Ley del mineral</b>	Baja Ley	Baja o media	Media o alta	Alta ley
<b>Tonelaje</b>	Grande	Grande a mediano	Amplio rango	Amplio rango
<b>Inversión</b>	Mínima	Media	Media a alta	Alta
<b>Granulometría</b>	Corrido de mina	Chancado grueso	Chancado medio	Molienda húmeda
<b>Recuperaciones Lípidas</b>	40 -50%	50 – 70%	70 a 80%	80 a 90%
<b>Tiempo de Tratamiento</b>	Varios años	Varias semanas	Varios días	Horas
<b>Calidad de Soluciones</b>	Diluidas (1-2 gpi)	Diluidas (1-6 gpi)	Concentradas (20-40 gpi)	Medianas (5-15 gpi)
<b>Problemas principales en su aplicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación incompleta</li> <li>• Represipitación de Fe y Cu</li> <li>• Canalizaciones</li> <li>• Evaporación</li> <li>• Pérdidas de soluciones</li> <li>• Soluciones muy diluidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación incompleta</li> <li>• Requiere de grandes áreas</li> <li>• Canalizaciones</li> <li>• Precipitaciones</li> <li>• Evaporación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloqueo por finos</li> <li>• Requiere más inversión</li> <li>• Manejo de materiales</li> <li>• Necesidad de mayor control de planta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Molienda</li> <li>• Lavado de contracorrientes</li> <li>• Tanques de relaves</li> <li>• Inversión muy alta</li> <li>• Control de la planta debe ser más sofisticado</li> </ul>

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

### 2.2.6.3. Agentes lixiviantes

El principal objetivo del proceso de lixiviación utilizado en las minas es disolver selectivamente los minerales relevantes en la mena, separar la solución cargada de los sólidos y recuperar los minerales presentes en forma metálica. Un agente lixivante es una sustancia química que disuelve selectivamente uno o más componentes sólidos o líquidos. La selección de estos reactivos depende de varios factores como disponibilidad, costo, estabilidad química, corrosividad y selectividad. Este último factor es el más importante porque depende de si el material funde efectivamente el metal con el que se está trabajando.

Estos agentes se dividen en ácidos y bases, que se pueden elegir en función de los contaminantes a tratar. Las sales de sulfato, como el sulfato de hierro II ( $\text{FeSO}_4$ ), el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), incluso el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y a su vez el cianuro de hidrógeno (HCN) son los reactivos más comunes utilizados para lixiviar metales de interés. La tiourea y el tiosulfato también se denominan minerales de lixiviación de cobre y mineral de lixiviación de oro. Sin embargo, no se usa en aplicaciones de minería global debido a problemas más complejos de manejo de productos químicos y preocupaciones ambientales. (Jurado, 2018, p.10-11).

**Ácidos:** Para la extracción de los óxidos metálicos contenidos en la naturaleza como el óxido de zinc, el óxido de cobre y el óxido de estaño, se utilizan lixiviantes ácidos. Los principales reactivos que se aplican son:

**Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).** Es el medio lixivante más utilizado en este proceso, ya que tiene una alta facilidad de manejo químico, bajo costo y alta disponibilidad en el mercado de productos químicos. Se utiliza principalmente para la recuperación de cobre, níquel, cromo, zinc, etc.

**Ácido clorhídrico (HCl).** Es el segundo reactivo para lixiviación más utilizado. Tiene ventajas como su disponibilidad en el mercado, una alta solubilidad y un bajo costo. Su principal ventaja es que se disocia completamente en una solución acuosa al ser un ácido fuerte. Principalmente es utilizado para recuperar níquel, cadmio y zinc.

**Ácido nítrico ( $HNO_3$ ).** Al ser un agente oxidante reacciona con la mayoría de los metales preciosos o de interés por lo que es muy utilizado como reactivo en procesos metalúrgicos. Comúnmente utilizado para la obtención de oro y plata.

Otros reactivos lixiviantes ácidos utilizados son: ácido acético, ácido perclórico, ácido cítrico, ácido férrico, ácido carbónico, cloruro de hierro, etc. (Lombana et. al., 2018, p.2).

**Básicos:** Los reactivos para lixiviación básicos se utilizan comúnmente en los procesos de metalurgia extractiva de cobre, oro, plata. Los más utilizados son:

**Amoníaco ( $NH_3$ ).** Este reactivo posee una alta solubilidad con el agua. Posee una excelente capacidad de filtrado y separación de metales, por su capacidad para la formación de compuestos y su facilidad de donar electrones al hidrógeno. Generalmente se utiliza en la extracción de cobre.

**Cianuro ( $CN^-$ ).** Se considera una solución acuosa básica que disuelve los minerales de cobre. En la industria se lo utiliza para los procesos de cianuración de oro y plata, pero es un proceso altamente tóxico y nocivo para la salud humana (Lombana et. al., 2018, p.2).

#### *2.2.6.4. Características que debe reunir un agente de lixiviación*

El uso de reactivos de lixiviación depende en gran medida de la economía del proceso. Sin embargo, se tienen en cuenta varios factores al evaluar estos reactivos:



La solución lixivante debe elegirse de modo que los minerales metálicos de interés se disuelvan rápidamente y los metales no preciosos se disuelvan lentamente o eviten la disolución tanto como sea posible.

La solubilidad de los reactivos de lixiviación debe ser lo suficientemente alta para inducir una cinética de reacción adecuada.

Las soluciones lixiviantes deben minimizar los problemas de corrosión en los equipos de proceso. Los reactivos deben estar disponibles a bajo costo o de tal manera que puedan regenerarse o convertirse en subproductos útiles. (Molina, 2018, p.15).

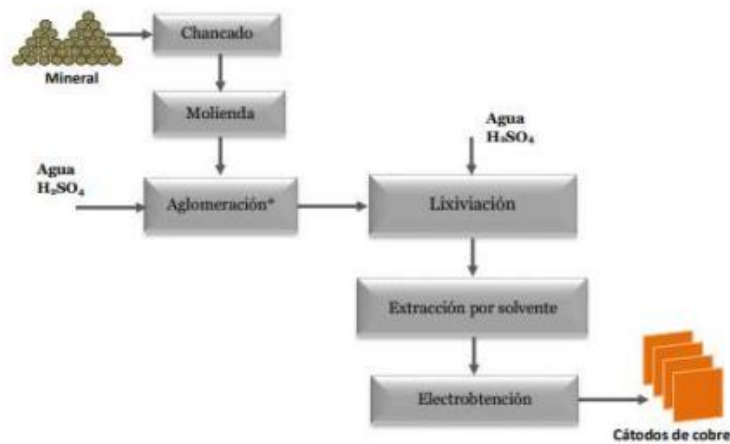
**Tabla 2-2:** Tipos de lixiviantes para algunos minerales comunes.

Tipo de mineral	Lixivante	Calibre típico de partícula	Tiempo típico de retención
Mineral de Cobre (calcopirita)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9 mm / 3/8 in	5 días
Mineral de Oro	NaCN	200 micrones / malla 65	4 - 24 horas
Concentrado de Oro	NaCN	45 micrones / malla 325	10 - 72 horas
Ilmenita	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	75 micrones / malla 200	0,5 hora
Mineral de Níquel (laterita)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	150 micrones / malla 100	2 horas
Mineral de Plata (argentita)	NaCN	200 micrones / malla 65	72 horas
Mineral de Uranio (uraninite)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	150 micrones / malla 100	90 horas

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

#### 2.2.6.5. Lixiviación de minerales de cobre

El proceso de obtención de cobre necesita una lixiviación ácida de minerales de cobre con ácido sulfúrico, para luego combinarse con operaciones de extracción con ayuda de solventes y finalmente aplicar métodos de electro obtención.



**Ilustración 2-20:** Proceso de obtención de cobre por vía hidrometalúrgica

Fuente: Richardson, 2007, p.17.

A nivel industrial existen diversas operaciones para lixiviación que varían según el mineral, granulometría, el flujo del mineral, etc. Generalmente el proceso de lixiviación es empleado en pilas donde el mineral tiene un porcentaje de entre 0,25 y 1 % del peso total de la matriz, para este caso el ácido sulfúrico diluido es agregado mediante aspersion desde el punto más alto de la pila, disolviendo el cobre. La disolución que se recolecta debajo de la pila debe ser purificada y enriquecida mediante extracción por solventes y luego atravesar una etapa de electro obtención, este proceso puede durar meses o incluso años. Los métodos más usuales para realizar lixivaciones son in situ y de relaves. La tabla 01-2 muestra las técnicas utilizadas en lixivación a nivel industrial.

**Tabla 2-3:** Técnicas de lixiviación a nivel industrial

Técnica de lixiviación	Mineralogía	% Cu en el mineral	Tiempo de lixiviación	Producción estimada de Cu ton/año
Pila	Óxidos, calcosina	0,25 -	1 Meses – años	700 000
Botadero	Calcopirita	< 0,25	1 – 5 décadas	50 000
In Situ	Todos	>0,5	Décadas	50 000
Vat	Óxidos	1 -2	5 – 10 días	50 000
Agitación	Óxidos (Carbonatos)	20 – 40	2 – 5 horas	200 000
Relaves	Óxidos (Carbonatos)	0,25 -1	1 día	100 000

Fuente: Richardson, 2007, p.23.

- Lixiviación de óxidos de cobre

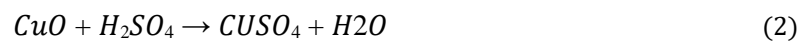
Debido a la presencia de óxidos de cobre en las capas más superficiales de la tierra, estos minerales se han convertido en una materia prima óptima para la atención de cobre con una ventaja frente a otras fuentes por su abundante disponibilidad. Para la obtención de cobre, los minerales contenedores de óxidos de cobre deben pasar por un proceso de fragmentación,

aglomeración, apilado en pilas para luego tratarse con ácido para obtener sal de cobre disuelta y agua. La velocidad de extracción de cobre tiene una estrecha relación con el número de electrones que se requiere remover para conseguir una solubilidad de cada una de las especies (Rodríguez, 2018, p.25).

El ejemplo más representativo de este tipo de disoluciones ácidas es el de la malaquita y sigue la siguiente reacción:



La tenorita es otro elemento representativo de este método su reacción de obtención es:



La siguiente tabla muestra información cualitativa de cinéticas relativas utilizadas según las especies minerales de cobre.

**Tabla 2-4:** Velocidades de disolución de cobre

Cinética relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales de cobre en esta categoría
Muy Rápida (a Temperatura Ambiente)	Segundos a minutos	Disolución completa Carbonatos (malaquita, azurita) Sulfatos (calcanita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas Disolución es completa	Óxidos cúpricos (tenorita), silicatos (crisocola y dioplasa)
Moderada (requieren oxidante)	Días a semanas	Disolución puede no ser completa Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad y copper pitch)
Lenta (requieren oxidante)	Semanas a meses	Disolución puede ser completa Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
Muy lenta (requieren oxidante)	Años Disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetraedrita)

Fuente: (Richardson, 2007, p.26).

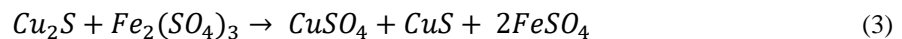
La lixiviación de minerales de sulfuros de cobre en medios de sulfato ha sido extensamente estudiada. Los procesos que utilizan medio sulfato tienen algunas potenciales ventajas sobre los otros en que la lixiviación química es generalmente simple y la tecnología para recuperar cobre de alta pureza está bien establecida. Desafortunadamente, la calcopirita es conocida por su disolución extremadamente lenta en medios sulfatados. A pesar de las lentas tasas de lixiviación, hay una significativa cifra de nuevas actividades de desarrollo en procesos hidrometalúrgicos para tratar minerales de sulfuro de cobre. Estos procesos se pueden agrupar en tres categorías principales: (1) lixiviación con sulfato férrico, (2) lixiviación a presión en ambiente de oxígeno y

(3) biolixiviación, o mezclas de ellos. A continuación, se presenta una visión general de estos distintos métodos. (Tshilombo, 2004. p.25)

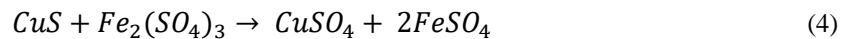
- Metodo Mt Gordon: lixiviación en ambiente ácido

Este proceso se basa en la disolución de minerales de sulfuro de cobre en una solución ácida con sulfato férrico, principalmente calcosina con adherencias de covelina y calcopirita. Generalmente, la calcosina reporta sobre el 90% del total de cobre presente. El proceso usa molienda de alimentación moderada 75-106  $\mu\text{m}$ . El efecto de tamaño de partícula fue investigado y la recuperación de lixiviación fue intensiva para un tamaño de partícula menor a P80=120  $\mu\text{m}$ . El proceso opera en una autoclave bajo el punto de ebullición ( $\sim 95^\circ\text{C}$ ) a una presión de 8 atm con un tiempo de residencia de 60 minutos. La calcosina se lixivía en dos pasos en solución de sulfato férrico:

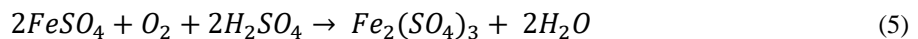
Lixiviación de calcosina – Etapa 1:



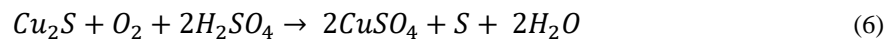
Lixiviación de calcosina – Etapa 2:



Regeneración de sulfato férrico



Reacción global de lixiviación de calcopirita:



- Proceso Activox: lixiviación a presión en ambiente de oxígeno

Activox es un proceso de lixiviación que opera aproximadamente a  $110^\circ\text{C}$  y una presión de oxígeno de 10 atm para el tratamiento de concentrados de sulfuro que contienen cobre, níquel, cobalto, zinc y oro. Activox consiste en la activación de la superficie del mineral por molienda ultrafina (P80=7-10  $\mu\text{m}$ ). Disminuir el tamaño inicial de partícula del mineral da lugar a un aumento en las áreas de superficie de lixiviación con un aumento correspondiente en el cobre lixiviado. La desintegración de la matriz por la alta energía de molienda también se denomina

“activación mecánica”. La activación mecánica aumenta las energías internas y superficiales, aumenta el área superficial y disminuye la energía de la coherencia de los sólidos. Los metales básicos se extraen en la solución de lixiviación, mientras que los metales preciosos permanecen en el residuo de lixiviación. Si el ácido es insuficiente durante la lixiviación Activox, el cobre puede precipitar como un sulfato básico de cobre en el residuo de lixiviación, el cual se puede recuperar fácilmente mediante un lavado con ácido.

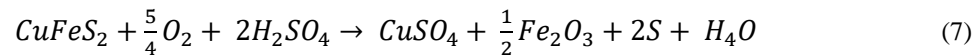
- Proceso MIM/Highlands Albion (Nenatech): lixiviación férrica.

El proceso Nenatech usa la lixiviación férrica bajo presión atmosférica, con oxígeno o burbujeo de aire a temperaturas cercanas a 80 °C. Este proceso utiliza la molienda ultrafina para reducir el tamaño de alimentación hasta aproximadamente 16-18  $\mu\text{m}$ . El azufre elemental formado en el proceso permanece en el residuo de lixiviación, lo que lleva a una mayor dificultad al momento de recuperar los metales preciosos. La recuperación de cobre es por extracción por solvente y electroobtención convencional. El proceso se ha ejecutado con éxito a escala de planta piloto. MIM y Highlands Pacific poseen conjuntamente este proceso. (Tshilombo, 2004. p.25)

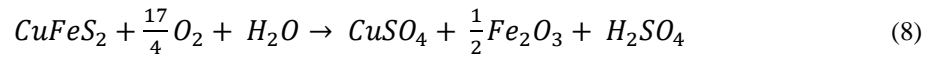
- Proceso Hidrometalúrgico AAC/UBC: lixiviación a presión

La corporación Anglo American y la Universidad de British Columbia han desarrollado un proceso de lixiviación de calcopirita bajo presión de oxígeno moderada (10-12 atm) a 150 °C. La lixiviación de la calcopirita a 150 °C en presencia de azufre elemental requiere condiciones de proceso que impidan el recubrimiento de calcopirita sin reaccionar por azufre líquido y evitar la pasivación debido a la presencia de una capa de sulfuro de cobre [23]. Se observó que la viscosidad del azufre disminuye de los 115 a los 159 °C, pero se incrementa drásticamente entre 159 y 190 °C. Por lo tanto, es esencial trabajar a temperaturas inferiores a 159 °C. El proceso utiliza aditivos tensoactivos tales como lignosulfonato de calcio y ortofenilendiamina (OPD) para dispersar el azufre fundido. La alimentación es finamente molida (P80=5- 20  $\mu\text{m}$ ). Se ha alcanzado una extracción de 95% para cobre y zinc a 150 °C en dos horas de tiempo de residencia. Para tamaños de partículas más gruesas, la lixiviación cesa en alrededor de 80% de extracción de cobre debido a la pasivación. El grado de oxidación del azufre es relativamente alto. El rango de rendimientos para el azufre elemental está entre 59 y 80%. El sulfuro de la calcopirita puede ser oxidado a azufre elemental o a través de sulfato de acuerdo a las siguientes reacciones:

Formación de hematita y azufre elemental:



Formación de hematita y sulfato:



Se puede observar que al tener oxígeno como producto de la reacción, el consumo de oxígeno es 1,25 mol por mol de Cu, sin embargo al tener sulfato como producto de la reacción, el consumo de oxígeno aumenta a 4,25 mol por mol de Cu. Por lo tanto, resultan deseables altos rendimientos para el azufre elemental (80-100%) y así reducir el consumo de oxígeno. La recuperación de cobre se lleva a cabo mediante el proceso tradicional, extracción por solventes y posterior electroobtención. Los metales preciosos en el mineral pueden ser recuperados por cianuración. (Tshilombo, 2004. p.25)

#### 2.2.2.6. Ventajas y desventajas de la lixiviación

- **Ventajas de la lixiviación**

La lixiviación es el tratamiento húmedo de materiales minerales que están principalmente oxidados, contienen metales y han sido reducidos en tamaño con una solución ácida o básica que sirve para disolver los minerales y concentrarlos en una solución. Es una tecnología minera, aplicable a gran escala, se considera un proceso "hidrometalúrgico" capaz de extraer bajas concentraciones de "minerales" clasificados, reduciendo el costo por tonelada del mineral extraído y aumentando la rentabilidad de la explotación.

La lixiviación es un proceso más simple y menos peligroso que el proceso pirometalúrgico, ya que no hay contaminación por gases. Dado que la temperatura de reacción es necesaria para garantizar la rentabilidad del proceso de química de reactivos, el punto de control de la lixiviación es principalmente la posible acidez del residuo para evitar la toxicidad y monitorear la eficiencia del proceso. En general, la lixiviación permite responder a cuestiones fundamentales de la actividad industrial humana en cuanto a tratar de conseguir el máximo beneficio económico con el menor coste y complejidad posible. A su vez, permite lograr el equilibrio económico adecuado entre los recursos proporcionados, la inversión inicial, los costos de operación, la energía, los insumos, los reactivos, los ácidos, el agua, la mano de obra, etc. (Cárdenas et. al., 2010, p. 8-9)

- **Desventajas de la lixiviación**

Dado que la lixiviación es un proceso químico que permite acelerar y optimizar la cinética de separación de materiales, se aplica a todos los procesos de intervención externa desarrollados para mejorar la eficiencia de la metalurgia extractiva. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes, tales como:

Se requieren condiciones locales de alta permeabilidad o pre-fragmentación.

Durante ese proceso, la fuerza gravitacional a la que está expuesta puede provocar fugas o pérdida de solución.

Se trabaja principalmente los minerales de baja ley económica.

Tienen un ciclo muy largo y un modo de funcionamiento a largo plazo.

En cuanto a la lixiviación en pilas, su costo es ligeramente superior debido a un procesamiento más complejo en la sección de trituración (secundaria y terciaria).

No hay suficiente certeza acerca de una buena aglomeración uniforme de partículas finas alrededor de partículas gruesas. (Esto se puede resolver estableciendo un movimiento de rotación de las partículas húmedas a su alrededor y uniendo la tensión superficial). Si las partículas están aglomeradas, estamos hablando de condiciones de capilaridad.

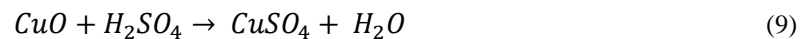
Este proceso produce una suspensión sólida/líquido cuando se excede la cantidad correspondiente de líquido. En este momento, no hay fuerza para mantener las partículas fijas, por lo que las partículas en movimiento ocupan más espacio entre ellas, dando como resultado el fenómeno de "lecho inundado" (Cárdenas et. al., 2010, p.9-10)

### ***2.2.7. Lixiviación por agitación.***

La lixiviación de minerales de cobre es un proceso que permite una recuperación más eficiente y económica. Los procesos de lixiviación pueden ser divididos de acuerdo a los solventes usados, así como por los procesos aplicados según la ley del mineral.

a) Lixiviación de minerales de cobre de alta ley.

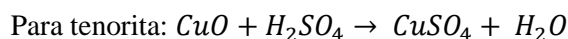
Cuando se trata de minerales oxidados de alta ley que no contengan cantidades importantes de carbonato, el solvente es  $H_2SO_4$ , el que se usa en soluciones con un pH entre 1 y 1,5, con concentraciones entre 5 y 40%. El mineral debe ser previamente quebrado y molido para alcanzar el tamaño de partícula necesario (malla#80). Cuando se trata minerales que no contienen arcilla, se lixivia en tanques fijos con doble fondo o en tanques con agitación. Generalmente la recuperación de los valores de cobre es del orden del 90%.



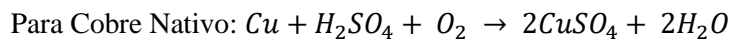
La separación de la pulpa de las soluciones preñadas con  $CuSO_4$  puede hacerse por el sistema contracorriente. Cuando se trata de minerales gruesos, simplemente se separan los sólidos que arrastran las soluciones mediante asentamiento. Las soluciones con  $CuSO_4$  pueden pasarse a precipitar o sedimentar con hierro. (Cárdenas et. al., 2010, p.15-18)

b) Mineral de baja ley:

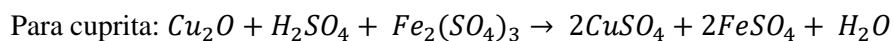
Para este tipo de mineral se utiliza una lixiviación con agua acidulada con  $H_2SO_4$  o simplemente agua acidulada por la oxidación de piritas formándose sulfato ferroso y férrico ( $FeSO_4 - Fe_2(SO_4)_3$ ), los que al reaccionar con los minerales de cobre, forman sulfato de cobre. El agua que escurre de esta lixiviación pasa a decantación para quitarle la arcilla en suspensión y posteriormente llevada a precipitación. Las reacciones químicas de la disolución del cobre se detallan a continuación: (Cárdenas et. al., 2010, p.18-20)



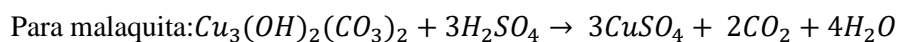
(10)



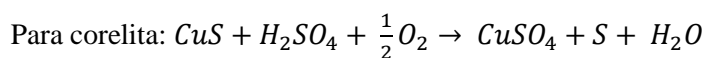
(11)



(12)

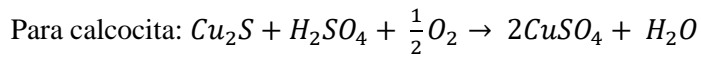


(13)



(14)





(15)

### 2.2.7.1. Agitación

Metso Minerals, (2011) afirma: “La agitación es una técnica para crear un movimiento cíclico de un líquido en un recipiente, que se utiliza para:

- Mezcla moderada (floculación):

La floculación es una etapa donde se realiza una mezcla suave, que aumenta el tamaño de las partículas de microflóculos submicroscópicos a partículas suspendidas visibles. Estos microflóculos se ponen en contacto entre sí mediante el proceso de mezcla lenta. El choque de las partículas de microflóculos hace que se unan para producir flóculos más grandes y visibles. El tamaño del flóculo continúa creciendo a través de choques o colisiones adicionales y la interacción con polímeros inorgánicos formados por el coagulante o polímeros orgánicos añadidos, formando así los llamados macroflóculos.

Se pueden agregar polímeros de alto peso molecular, llamados floculantes, durante este paso para ayudar no sólo a unir y fortalecer el flóculo, sino también para aumentar el peso y la velocidad de sedimentación. Una vez que el flóculo ha alcanzado su tamaño y resistencia óptimos, el agua está lista para el proceso de separación (sedimentación, flotación o filtración). Los tiempos de contacto de diseño para la floculación varían de 15 o 20 minutos a una hora o más. (Aguilar., 2002, p.5-8)

Esta velocidad es característica en procesos de mezclado no críticos, para operaciones de almacenado, tanques de depósitos, de alimentos o de floculación o aquellos procesos con tiempos prolongados de mezclado y para procesos de mezclado con poco movimiento en la superficie. También se utiliza para coeficientes de viscosidad menores a 10.

- Mezcla estándar (solución, suspensión sólida, almacenamiento, lixiviación y condicionamiento).

En algunos sistemas de agitación se suspende un sólido en el líquido agitado. Hay ejemplos en los que un sólido finamente disperso se debe disolver en el líquido, se suspenden microorganismos en la fermentación, se debe producir una mezcla homogénea de sólido y líquido para alimentar un proceso o se usa un sólido suspendido como catalizador para apresurar una reacción.

La suspensión de sólidos es un tanto parecida a un lecho fluidizado. En el sistema agitado, las corrientes de circulación del líquido conservan las partículas en suspensión. La cantidad y tipo de agitación necesaria depende principalmente de la velocidad terminal de sedimentación de partículas.

Esta agitación es adecuada para la mayoría de las funciones de mezclado. Es empleada en tanques de reacción, de agitación con tiempos moderados de agitación o mezclado. Es ideal para procesos de mezclado con fuertes movimientos en superficie y para coeficientes de viscosidad menores a 50. (Aguilar., 2002, p.8-11)

- Mezcla intensiva (frotación y depuración)

Muchas veces, el tener una completa o total suspensión de partículas nos conlleva a realizar un proceso muy drástico de mezclado, aunque al contar con diferentes geometrías de impulsor se tienen también diferentes tasas de disipación de energía. Este tipo de agitación es empleada en aplicaciones muy especiales de tipo crítica. Principalmente se utiliza en Reactores, cuando existe transferencias críticas de calor y eficiencias altas de corte, para procesos de polimerización y procedimientos de mezclado casi instantáneos. También se aplica a superficies inestables bajo ebullición, con salpicaduras y con vórtice y a soluciones con coeficientes de viscosidad menores a 10,000. (Aguilar., 2002, p.12)

#### *2.2.7.2. Tipos de flujo*

- **Flujo axial**

Este tipo de flujo circula alejándose del impulsor a aproximadamente 45 °C y regresa a la región central del impulsor, creando un campo de flujo de ida y vuelta paralelo al eje de rotación. Ocurre entre los números de Reynolds de 200 y 600 y se vuelve radial a medida que el número de Reynolds disminuye.

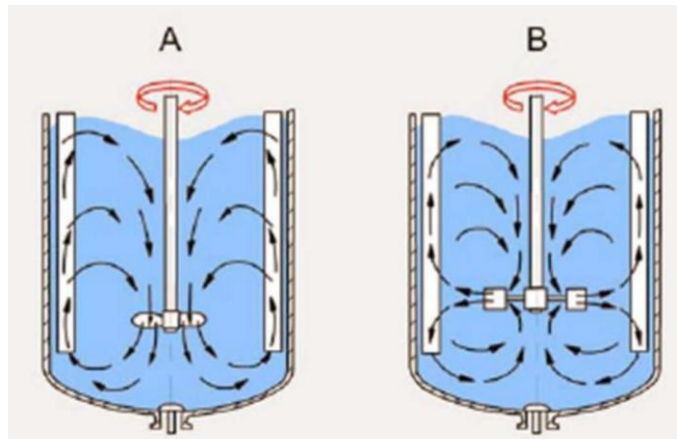
Los agitadores axiales incluyen todas las máquinas en las que las palas forman un ángulo inferior a 90 grados con respecto al plano perpendicular al eje. Los impulsores y las turbinas con palas o álabes son los más típicos de este tipo de motor. Hay dos etapas básicas de la velocidad de rotación. 1150-1750 rpm para transmisión directa y 350-420 rpm para caja de cambios. Las unidades transportadoras accionadas por engranajes se usan comúnmente para suspender

materiales sólidos, pero las unidades de reacción de alto nivel o alta velocidad son más adecuadas (Castillo, 2013, p. 12).

- **Flujo radial**

“Este tipo de flujo se genera perpendicular al eje del impulsor en dirección radial tangencial” (Optimización de Procesos y Tecnología S.A.S, 2017). Los álabes que producen este tipo de flujo suelen ser álabes planos. Se puede utilizar para cualquier Reynolds y proporciona una alta velocidad tangencial, a pesar de la menor capacidad de accionamiento.

En la mayoría de los procesos de mezclado industrial, se requiere que la potencia del motor sea lo más alta posible, mientras que la velocidad tangencial no es un factor crítico y, por lo tanto, es mejor evitarla. (Castillo, 2013, p. 12)



**Ilustración 2-21:** Campos de velocidades en depósito de Agitación - Flujo Axial (A) y Radial (B).

**Fuente:** (Collahuazo & Maldonado, 2012)

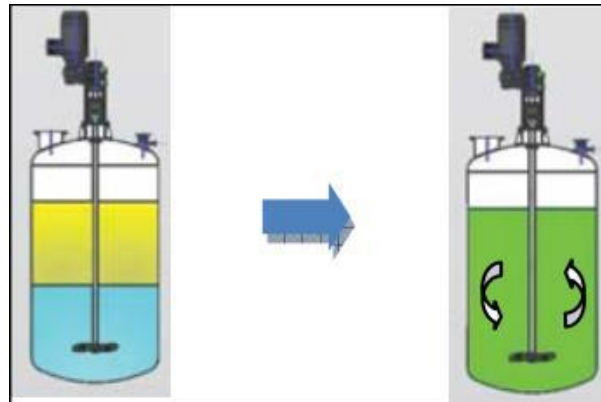
### 2.2.7.3. Aplicación de la agitación en el proceso de producción

Castillo, (2013) manifiesta, La agitación se puede utilizar en el proceso de fabricación para muchos propósitos diferentes y dependerá de lo que se pretenda para el tipo de proceso que se utilice. Estas aplicaciones incluyen:

- **Homogeneización de un fluido**

Se define como una mezcla de líquidos disueltos cuyo propósito principal es lograr gradientes de temperatura y gradientes de concentración en equilibrio. Entre otras cosas, se utiliza para

neutralizar ácidos/bases, diluir soluciones altamente concentradas, mezclar medios a diferentes temperaturas y dispersar suspensiones de polímeros para aglomeración (Castillo Uribe, 2013, p. 9).

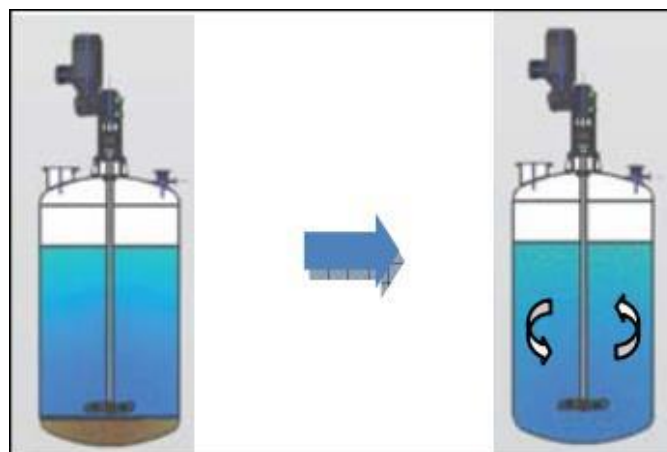


**Ilustración 2-22:** Homogeneización de dos fluidos.

**Fuente:** Castillo Uribe, 2013

- **Suspensión de un sólido en un líquido**

Implica dispersar sólidos en líquidos para mantener los sólidos en suspensión, lograr una distribución uniforme y disolver los sólidos. Los agitadores suspenden partículas sólidas en un líquido. La capacidad de suspensión de un mezclador varía con la densidad y la viscosidad del líquido, así como con la densidad, la concentración y el tamaño de las partículas en el sólido. Se utiliza en procesos de cristalización y reacciones catalíticas entre líquidos y sólidos. (Castillo Uribe, 2013, p. 9)

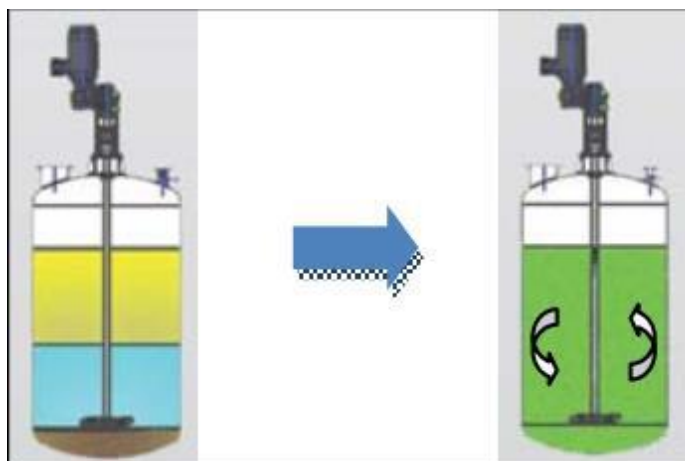


**Ilustración 2-23:** La agitación permite mantener los sólidos en suspensión.

**Fuente:** Castillo Uribe, 2013

- **Emulsión de dos fluidos insolubles**

Se forman por la dispersión de un líquido en otro y no pueden disolverse ni mezclarse entre sí. Es cierto que su propósito es aumentar la superficie específica del líquido. Para procesos de polimerización, suspoemulsión, polimerización en emulsión y extracción líquido-líquido. (Castillo Uribe, 2013, p. 10)

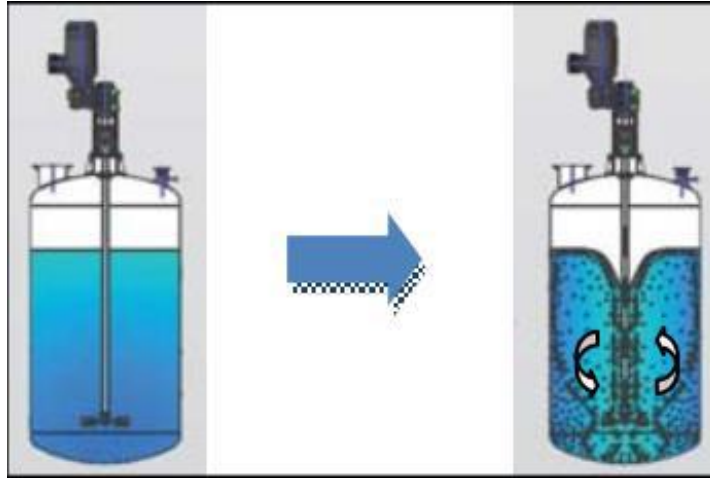


**Ilustración 2-24:** Dispersión de tres fluidos insolubles.

Fuente: Castillo Uribe, 2013

- **Inyección de gas en un fluido**

Se forma dispersando un gas en un líquido. Se utiliza para la reacción gas-líquido, la fermentación aeróbica y el suministro de oxígeno en el tanque de aireación. La interacción gas-líquido generalmente requiere la mayor área de contacto que se puede lograr con pequeñas burbujas de gas y se logra principalmente mediante agitación a alta velocidad. (Castillo Uribe, 2013, p. 10)

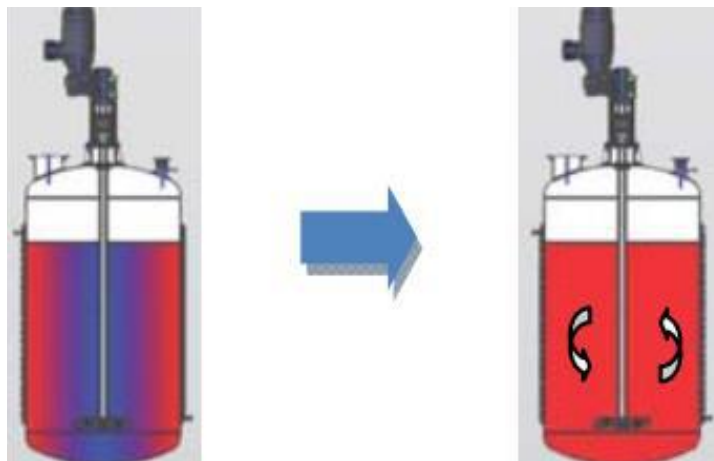


**Ilustración 2-25:** El gas pasa a través del eje hacia el fluido agitado.

Fuente: Castillo Uribe, 2013

- **Intercambio térmico entre un fluido y superficie de enfriamiento**

Consiste en el intercambio de calor entre líquidos a diferentes temperaturas y la superficie del líquido de manera que se pierde el calor de reacción y se puede lograr una reducción de la viscosidad del líquido por calentamiento. En su lugar, permita que la temperatura sea uniforme en todo el producto. La mezcla puede lograr coeficientes de transferencia más altos que la convección natural sola y se pueden lograr ahorros de energía en las superficies del intercambiador de calor. (Castillo Uribe, 2013, p. 11)

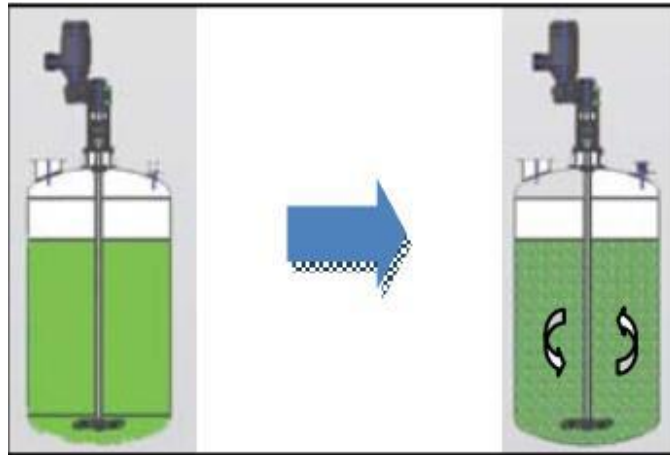


**Ilustración 2-26:** La agitación permite temperaturas homogéneas en todo el estanque.

Fuente: Castillo Uribe, 2013

- **Fermentación o biolixiviación**

Es un proceso biológico con o sin oxígeno (aeróbico o anaeróbico). La agitación durante la fermentación asegura la homogeneidad microbiana en el medio nutritivo. La temperatura, el pH, la absorción de oxígeno durante la fermentación anaeróbica y la eliminación de los gases generados durante la fermentación anaeróbica son muy importantes en estos procesos (Castillo Uribe, 2013, p. 11).

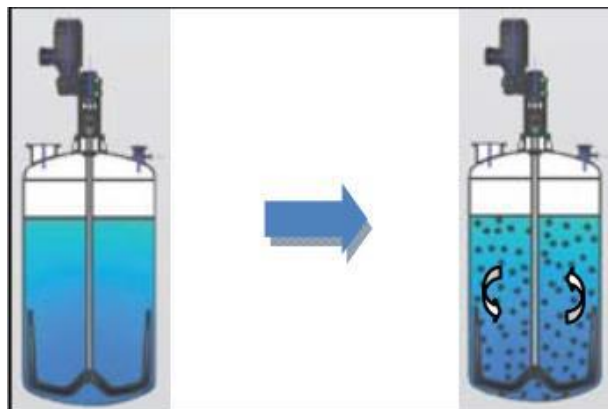


**Ilustración 2-27:** Microorganismos suspendidos a través de la agitación.

Fuente: Castillo Uribe, 2013

- **Cristalización**

La cristalización se utiliza para purificar sólidos. La agitación debe ser lo suficientemente fuerte para mantener los cristales en suspensión y lo suficientemente suave para no romperlos. (Castillo, 2013, p. 12).

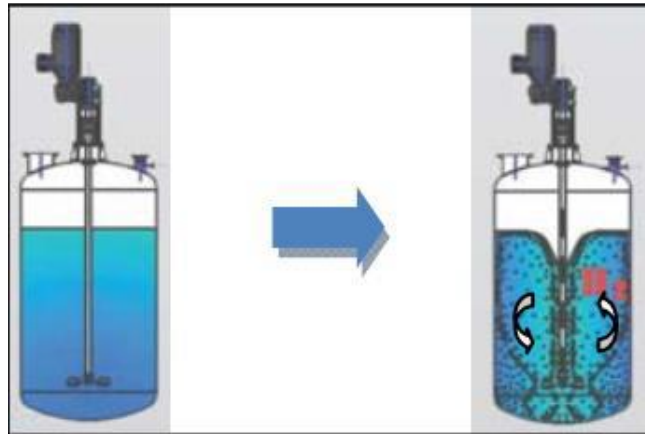


**Ilustración 2-28:** Cristales suspendidos en el proceso de agitación.

Fuente: Castillo Uribe, 2013

- **Hidrogenación**

La hidrogenación se puede utilizar en las industrias farmacéutica, química y alimentaria. La fábrica de generadores de hidrógeno produce equipos industriales de hasta 20 metros cúbicos. El hidrógeno se puede suministrar fuera del mezclador o a través de un eje hueco, con aire en la entrada de la turbina. (Castillo, 2013, p. 12)



**Ilustración 2-29:** Adición de hidrógeno a través del eje agitador.

**Fuente:** Castillo Uribe, 2013

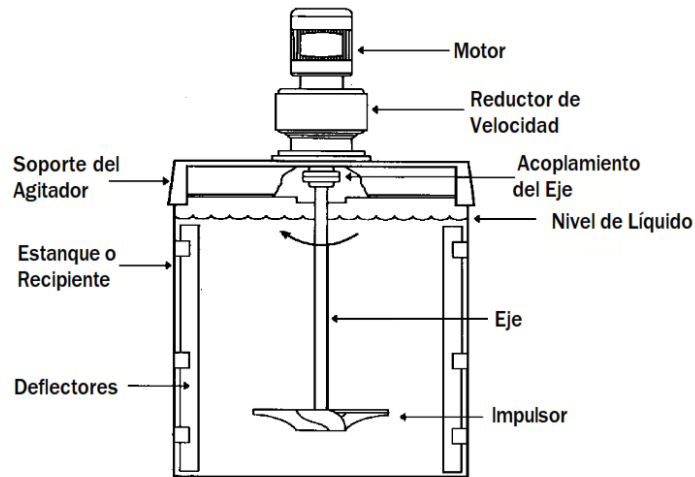
#### 2.2.7.4. Agitadores

Un agitador es un dispositivo que generalmente produce un movimiento periódico en algún tipo de recipiente o estanque que se puede cerrar o abrir. (Castillo, 2013, p.14).

- **Configuración**

La composición de estos dispositivos varía según la agitación de líquido, el tamaño del tanque, el tipo de líquido, etc.; Pero en general, esta composición explica:





**Ilustración 2-30:** Esquema general de un agitador.

**Fuente:** Basics in Minerals Processing, Metso Minerals, 2011

- **Impulsores**

El impulsor es el encargado de mover el fluido; Consiste en placas u hojas de forma especial requeridas para el movimiento de fluidos. El material del que está hecho corresponde a los esfuerzos realizados. Suelen estar basados en aleaciones metálicas y son principalmente de tres tipos: hélices, hélices y turbinas.

- **Tanques de almacenamiento**

“Un tanque suele ser un recipiente de acero diseñado para contener o manejar líquidos a presión atmosférica o interna relativamente baja” (Granja Petrolífera Corp., 2010, p. 1). Se distinguen de los recipientes a presión porque normalmente funcionan sin (o con muy poca) presión. Suelen estar fabricados con piezas metálicas como acero al carbono o acero inoxidable bajo pedido.

**Tipos de tanques de almacenamiento**

Carhuanchu, Espejo, & Valerio, (2010) presentan la siguiente división:

**Por su construcción:**

Instalado en fábricas: donde la operación es temporal y requiere desmontaje, que es fácil de operar.

Soldados: Estos tanques tienen la gran ventaja de una alta capacidad de almacenamiento y juntas de placas soldadas permanentes. Esto significa evitar posibles fugas en los tanques de tornillo.

### **Por su capacidad:**

Cilindros horizontales: Suelen ser de masa relativamente baja, ya que sufren problemas de rotura y flexión. A menudo se utilizan para el almacenamiento de pequeños volúmenes.

Cilindros verticales: permiten almacenar grandes cantidades de mercancías a bajo costo. Con la restricción de que solo pueden usarse a presiones atmosféricas o internas relativamente pequeñas.

#### *2.2.7.5. Principio Químico*

La lixiviación por agitación es el proceso de extraer uno o más solutos de un sólido usando un solvente líquido. Las dos fases están en íntimo contacto y uno o más solutos pueden cambiar de sólido a líquido, provocando la separación de los componentes sólidos originales. La lixiviación depende de la solubilidad en el solvente utilizado para la extracción. Para que el proceso de filtración sea efectivo, el soluto debe ser absorbido en la fase líquida, no en la fase sólida a la que pertenece. Como equilibrio entre fases, la filtración puede ser cuantitativa, como la extracción líquido-líquido (>99,9%), pero no total (100%), por lo que la fase sólida siempre contendrá algo de soluto. (Cárdenas, 2011, p. 17). El proceso consta de cuatro etapas:

Disolución de un soluto en una fase líquida.

Separación de sólidos inertes (fase portadora)

Recuperación de solventes (solo si es económicamente factible).

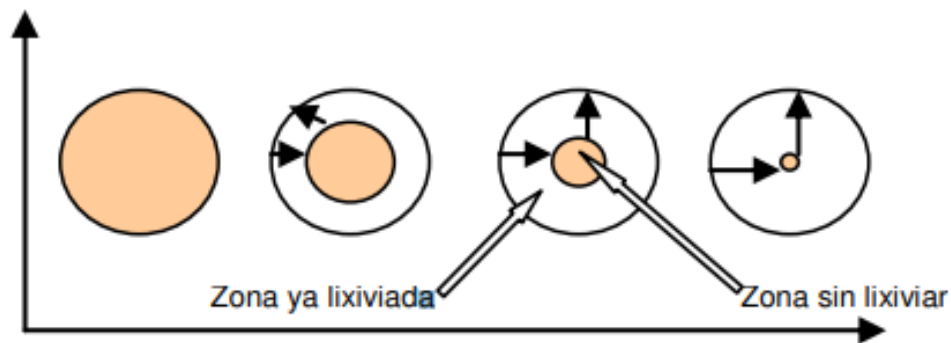
Lavado de los sólidos.

La tasa de filtración se produce con un comportamiento parabólico. Esto se debe a la fase involucrada en el mecanismo de filtración de las partículas metálicas. Aquí están los pasos:

- a) La permeación de la reacción ( $H_2$ ,  $Fe^{+3}$ ) se difunde a través de la capa límite hacia la superficie de la partícula.
- b) Los reactivos del filtro se difunden a las partículas en la zona de reacción.
- c) Tiene lugar una reacción química, se forman los productos de la reacción y los solutos de la reacción ( $Cu^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ) se difunden dentro de la partícula hacia la superficie de la partícula.
- d) Los productos solubles se difunden a través de la capa límite hacia la solución.

La tasa de filtración es el primer pico cuando el detector toca directamente la superficie de las partículas de metal. Con el tiempo, la velocidad de reacción disminuye a medida que aumenta el área de la superficie de reacción. Se necesita tiempo para que la superficie de la partícula y los

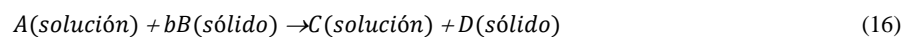
reactivos y productos pasen a través de la perla. A continuación, se muestra un diagrama que muestra el proceso. (Dávila, et. al. 2003, p. 265).



**Ilustración 2-31:** Mecanismo de lixiviación de un mineral

Fuente: Castillo Uribe, 2013

Este mecanismo es la fuente del comportamiento similar a una fuga. En el caso extremo, la ecuación de velocidad de reacción para la lixiviación de partículas metálicas se obtiene de la siguiente manera: donde la velocidad de filtración está determinada por la velocidad de difusión del medio filtrante a través del sólido. Las siguientes reacciones se utilizarán como modelos.



Esto corresponde al caso en que el mineral B se lava con el reactivo de filtro A para dar un producto soluble C y un producto sólido D, un producto de tenorita soluble. Cuando se lixivía con iones férricos,  $Fe^{+3}$  corresponde a A,  $CuS$  B,  $Cu^{+2}$  y  $Fe^{+2}$  a C, y  $S^0$  corresponde al producto sólido.

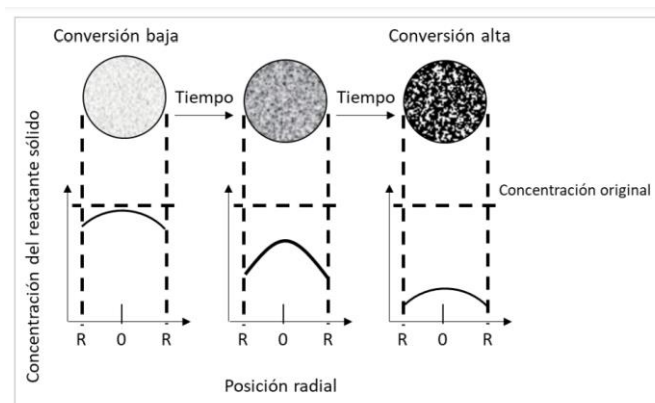
#### 2.2.7.6. Modelos cinéticos de procesos de lixiviación

Varios modelos describen un proceso de filtración en el que un líquido entra en contacto con un metal y reacciona con él para formar un producto. Es importante señalar que cualquier diagrama o modelo conceptual que represente una reacción en función del tiempo corresponde a una representación matemática, las ecuaciones de movimiento. Entonces, si obtenemos un modelo, tenemos que aceptar las ecuaciones de movimiento correspondientes y viceversa. Así, una representación dinámica que coincida con el modelo de comportamiento real puede describir y predecir la verdadera dinámica del proceso. Por otro lado, si el modelo difiere significativamente del comportamiento real, es decir, si el modelo no está configurado correctamente, la representación del movimiento se vuelve inválida. (Apablaza, et. al., 2013, p.3)

Por lo tanto, las condiciones que debe cumplir el modelo son que forme una representación lo más cercana posible al proceso real, al mismo tiempo que tenga fórmulas matemáticas sin complicaciones y que sea fácil de manipular. Un modelo puede aproximarse a un proceso real en función de muchas variables, pero cada variable adicional hace que el modelo sea más costoso de usar debido a la cantidad de datos necesarios y, a menudo, requiere un uso más complejo de herramientas matemáticas. Hay varios modelos que intentan explicar la interacción entre las partículas sólidas y el líquido que las rodea. A continuación, se muestran dos ejemplos:

- **Modelo de conversión progresiva**

Este primer modelo asume que los reactivos impregnan todo el sólido y reaccionan simultáneamente, posiblemente con diferentes velocidades de reacción dependiendo de la posición de las partículas sólidas. Por lo tanto, los minerales presentes en los sólidos interactúan continuamente y progresivamente a lo largo del grano.

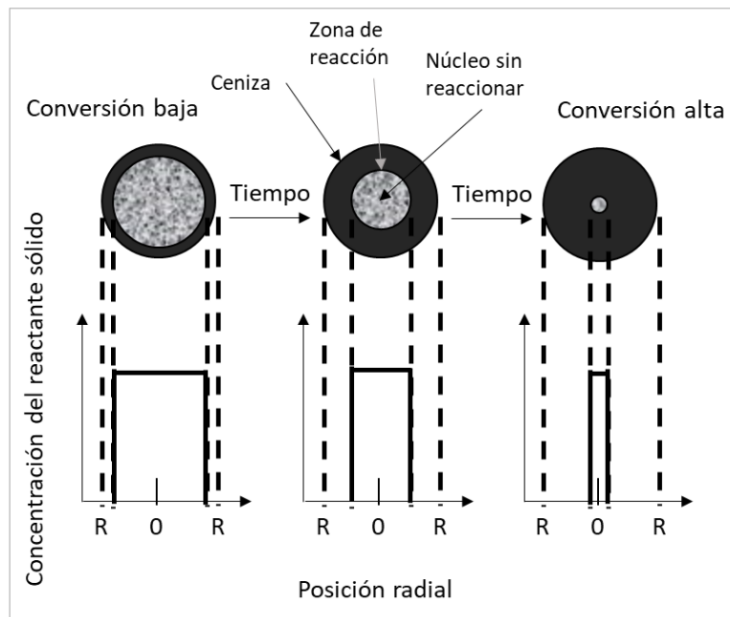


**Ilustración 2-32:** Esquema del modelo de conversión progresiva

**Fuente:** Castillo Uribe, 2013

- **Modelo de núcleo sin reaccionar**

Este primer modelo asume que los reactivos permean todo el sólido y reaccionan simultáneamente, posiblemente con diferentes velocidades de reacción dependiendo de la posición de las partículas sólidas. Por lo tanto, los minerales presentes en los sólidos interactúan continuamente y progresivamente a lo largo del grano.



**Ilustración 2-33:** Esquema del modelo de núcleo sin reaccionar

**Fuente:** Castillo Uribe, 2013

#### 2.2.7.7. Aspectos cinéticos

Es muy importante conocer la velocidad o dinámica del proceso porque la idea es obtener el mejor rendimiento en el menor tiempo posible. La cinética proporciona información que ayuda a comprender los mecanismos de reacción y el diseño de equipos y procesos. Los estudios cinéticos de la metalurgia son necesarios porque los procesos para los que se utiliza son generalmente lentos, operan a temperatura ambiente o ligeramente superior y reaccionan de manera heterogénea (Reveco, 2019, p. 4).

#### 2.2.8. Diseño de un tanque de lixiviación

Para el diseño y construcción de un tanque de lixiviación se deben considerar todas las variables involucradas en el proceso de lixiviación. El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado depende del tipo de rodete, de las características del fluido, tamaño y proporciones del tanque, placas deflectoras y agitador. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes y el tipo de flujo global en el mismo, depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad, de un punto a otro.

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de agitación y mezclado eficaz de los sólidos y fluidos involucrados. Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento

circulatorio en el interior del recipiente. El mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí.

#### *2.2.8.1. Materiales de construcción para un tanque de lixiviación*

La ciencia de los materiales define los metales como materiales cuyas bandas de valencia y conducción se superponen en estructuras electrónicas o metálicas. Esto lo convierte en un fácil conductor del calor y la electricidad y, a menudo, refleja la luz, lo que le da su brillo característico. El término metal se usa para denotar elementos químicos inusuales que, además de una excelente conductividad eléctrica y térmica a temperatura ambiente, son densos y sólidos, sus sales forman iones o cationes cargados positivamente en solución, y son flexibles y trabajables. Por estas razones, el equipo industrial en este caso es una excelente opción para crear un contenedor extraíble. (Grisebach y Vollmer, 2005, p. 7).

Los minerales se clasifican en:

**Metales Ferrosos:** Minerales de hierro. El hierro es un elemento abundante en la naturaleza porque forma parte del núcleo de la corteza terrestre y es el metal más abundante. Se clasifica en acero y aleaciones.

**Metales no ferrosos:** aquellos con un contenido en hierro muy bajo, normalmente inferior al 1%, y se clasifican en metales pesados y ligeros.

#### *2.2.8.2. Metales y aleaciones*

Estos incluyen acero, zinc, magnesio, aluminio, hierro fundido, níquel, titanio y cobre. Las aleaciones consisten en metales en los que uno o más metales están unidos entre sí, que también pueden convertirse en no metales. (Grisebach y Vollmer, 2005, p. 16).

- **Acero**

Consiste en una aleación de hierro y carbono, a menudo clasificados como aceros al carbono simples (que contienen pequeñas cantidades de Mn, Si, S y P además de carbono). Aceros aleados (níquel, cromo, vanadio, molibdeno y tungsteno) (Maldonado, 2006, p. 17).

## Clasificación del acero

**Tabla 2-5:** Clasificación más común del acero.

General			Norma UNE-EN ISO 36010		
Composición química	Aceros finos de construcción general	Aceros para usos especiales	Aceros resistentes a la oxidación y corrosión	Aceros para herramientas	Aceros de moldeo
Aceros al carbono Bajo carbono Medio carbono Alto carbono Aceros aleados Baja aleación Alta aleación	Finos al carbono Aleados de gran resistencia Aleados de gran elasticidad Cementación Nitruración	Fácil mecanización Fácil soldadura Propiedades magnéticas Dilatación térmica específica Resistentes a la fluencia	Inoxidables Resistentes al calor	Al carbono para herramientas Aleados para herramientas Rápidos	Al carbono de moldeo de usos generales Baja radiación Moldeos inoxidables

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

- **Acero Estructural**

Se compone de hierro (al menos 98%), carbono (0,5 - 1,5%) y elementos en menor cantidad como manganeso, azufre, sílice, fósforo, vanadio y oxígeno. Su eficiencia estructural es alta y se utiliza principalmente por su abundancia, resiste la flexión y la compresión y es de fácil montaje. Se utiliza en piezas de máquinas (recipientes, engranajes, ejes, palancas) y en el sector de la construcción (Angle & Carvajal, 2009, pág. 2).

### Clasificación del acero estructural.

- Acero estructural al carbono

Incluye carbono y manganeso en cantidades estrictamente definidas (1,7 % C, 1,65 % Mn, 0,60 % Si y 0,60 % Cu). El A36 es el acero más común con el límite elástico más bajo y está catalogado como el más adecuado para su uso en estructuras, puentes, operaciones de soldadura, pernos y equipos que no están expuestos a las condiciones ambientales de la escuela diaria.

**Tabla 2-6:** Propiedades mecánicas de los aceros estructurales al carbono.

Tipo ASTM	Espesor cm	Esfuerzo de fluencia Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tensión Kg/cm <sup>2</sup>	Elongación (%)
A36	Hasta 20	2530	4077-5624	En 5 cm.
	23-21			En 20 cm.
				20
Mayor a 20	2245	4077-5624	23	20
<b>A573</b>				

Grado 58	Hasta 3.9	2245	4077-4991	24	21
Grado 65	Hasta 3.9	2461	4570-5413	23	20
Grado 70	Hasta 3.9	2953	4921-6327	21	18

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

Se presentan los principales grados de acero de esta clasificación, que son los grados A36 y A573 (grados 58, 65 y 70), donde al comparar sus principales propiedades entre los dos grados, se puede observar que el acero tiene un límite elástico de  $F_y = 36$  kpsi.

- **Acero de alta resistencia y baja aleación**

Se compone de carbono, manganeso, vanadio, cromo, silicio, cobre, níquel, etc. Estos elementos de aleación no exceden; 5%, más resistente a la corrosión atmosférica que el acero al carbono (Angulo y Carvajal, 2009, p. 8)

- **Aleaciones de acero reforzado y templado para la construcción**

Tienen alta resistencia porque los elementos de aleación están presentes en mayor cantidad, más del 5%, y son tratados térmicamente, lo que les otorga tenacidad y resistencia (Angulo & Carvajal, 2009, p. 15).

- **Acero inoxidable**

Está hecho de hierro, carbono (0,8%) y cromo (al menos 11%). Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión (Ibarra, N., 2010, p. 21).

### Clasificación del acero inoxidable

**Tabla 2-7:** Propiedades generales de los aceros inoxidables

Tipo	Resistencia Corrosión	Dureza	Magnéticos	Temple	Soldabilidad
Martensíticos	Baja	Alta	Si	Si	Pobre
Ferríticos	Buena	Media-Baja	Si	No	Limitada
Austeníticos	Excelente	Alta*	No**	No	Excelente
*Adquieren mayor dureza al ser trabajados en frío **Adquieren cierto magnetismo al ser trabajador en frío					

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

El acero inoxidable es muy utilizado en la industria química, alimenticia y farmacéutica principalmente por las propiedades que posee, el grado austenítico, ya que tiene alta resistencia a la corrosión, excelente soldabilidad y no es magnético, es ideal para su uso en la construcción de



un tanque de flotador de turbina ya que son los elementos que ayudan a lograr una agitación limpia.

### Comparación de aceros inoxidables más utilizados

**Tabla 2-8:** Tipos de aceros más usados y sus aplicaciones

Tipo ASTM	Acero	Formas	Usos	$\sigma_y$ min (Ksi)	$\sigma_{ut}$ min (Ksi)
A-36	Al carbono	Perfiles y barras	Puentes, edificios, estructuras en general, atornillados, remachados y soldados, equipos no expuestos a fenómenos del ambiente	36 e<8” 32 e>8”	58 - 80
A-441	Alta resistencia y baja aleación	Doblados en caliente, tubos sin costura y barras hasta 1/5’	Estructuras remachadas, atornilladas o soldadas, pero principalmente para puentes y edificios soldados	40 - 50	60 - 70
A-572	Alta resistencia y baja aleación	Perfiles, placas y barras e<6”	Grados 42, 45 y 50 propuestos para puentes remachados, atornillados o soldados, edificios y otras estructuras. Grados 55, 60 y 65 destinado a puentes remachados o atornillados y otras estructuras que puedan atornillarse, remacharse o soldarse	42 - 65	60 - 80
A-514	Templados y revenidos	Placas e<4”	Propuesto para uso en puentes y otras estructuras soldadas, técnica de soldadura es muy importante	90 - 100	100 - 150
A-316	Inoxidable	Lámina, banda (tira)	En la industria química donde hay presencia de medios agresivos, en la industria alimentaria y médica.	36-248	30-205

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

En esta tabla se muestran las muestras de aceros de uso común en el Ecuador, sus formas de comercialización, necesidades y aplicaciones, los cuales presentan excelentes propiedades acordes con los objetivos comerciales, y se han decidido utilizar. Es popular en el país, fácil de obtener, fácil de procesar, fácil de soldar y no requiere ningún procesamiento porque se utilizará en equipos que no están expuestos a condiciones ambientales, alternativamente también se utilizará acero inoxidable A-316. de gran aplicación en industrias químicas por su excelente resistencia a la corrosión.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ingeniería del proyecto

##### 3.1.1. Tipo de Estudio

La finalidad del actual Trabajo de integración curricular corresponde al diseño y construcción de un equipo de lixiviación para el Laboratorio de Mineralogía, el cual se realizó con base a las normas ASTM y se empleó materiales en acero inoxidable. El tipo de estudio es técnico y se recolectó la información necesaria de fuentes bibliográficas confiables, que proporcionaron datos de construcción beneficiosos para el proyecto, la operación unitaria empleada es la extracción de sólido-líquido de un mineral, siendo importante para la recuperación de un metal por medio de un lavado de agua o sustancia químicas para separar el metal valioso de los no valiosos. Se consideró los parámetros como el volumen del lixiviador, volumen de lodos y el caudal de entrada y salida, en los que se emplearán cálculos de ingeniería, dimensionando el equipo requerido.

##### 3.1.2. Metodología

Como punto de partida se tiene la revisión bibliográfica, para continuar con la parte de ingeniería con la aplicación de cálculos del diseño. Finalmente, se construyó el equipo de lixiviación con el propósito de contribuir en la parte práctica de los estudiantes.

- **Métodos**

Dentro de la investigación se tienen los siguientes métodos: deductivo, inductivo y experimental, ya que, esto permite la resolución de interrogantes que surjan en el desarrollo del diseño y construcción del equipo lixiviador esto contribuirá a la metodología a emplear.

**Deductivo:** Para el diseño y construcción del equipo lixiviador, se identificó las variables del proceso como las presiones del equipo, la densidad de la materia de alimentación. Así como también, se los parámetros de diseño como la cantidad y volumen de muestra que ingresa, la elección de materiales adecuados, los flujos volumétricos para el correcto funcionamiento del equipo.

**Inductivo:** A partir de una idea general se planteó a nivel de laboratorio la extracción de materiales de mayor valor con base a materiales de menor valor, con el objetivo de realizar prácticas en el laboratorio de mineralogía, complementando las cátedras metalurgia y procesos extractivos. En función de esta idea, se plantea conocer el proceso que se le dan a los metales; en la lixiviación específicamente.

**Experimental:** Como punto final, se tomó toda la información recolectada para el dimensionamiento del equipo lixiviador mediante cálculos ingenieriles, se validó mediante pruebas o ensayos para la identificación del correcto funcionamiento.

### **3.2. Planificación de la construcción**

Para la construcción del equipo se seleccionó un tanque de agitación que permite que las partículas se transmuten en hidrofóbicas sin ningún contacto, así las burbujas de aire se adhieren elevando a la superficie una espuma.

#### **3.2.1. Alternativas de diseño**

Para el estudio de alternativas se dividirá al equipo en tres partes:

Conjunto tanque de almacenamiento – eje de transmisión.

Sistema de transmisión

##### **3.2.1.1. Conjunto de almacenamiento – eje de transmisión**

**Material:** Existen dos alternativas de materiales de construcción acero inoxidable y acero al carbono con uso de recubrimiento anticorrosivo, esto debido a que ambos evitan la corrosión dentro del equipo.

**Techo:** Para la lixiviación de metales preciosos o útiles se puede considerar tanques con techo fijo, flotante o sin techo.

**Fondo:** Los tanques de lixiviación pueden presentar fondo esférico y fondo plano.

**Eje de transmisión:** existen tres alternativas: para los ejes de transmisión las cuales son: excéntrico, lateral y concéntrico.

### 3.2.1.2. *Sistemas de transmisión*

**Configuración:** la configuración de la transmisión puede ser directa, transmisión con reductor de velocidad de “x” etapas o transmisión con reductor de velocidad simple y bandas y poleas.

### 3.2.1.3. *Acoplamiento*

**Configuración:** Existen tres configuraciones posibles: rígido embridado, rígido con estrías de involuta, flexible.

**Material:** Nuevamente se necesita materiales que eviten la corrosión, por lo que las opciones son: acero inoxidable y acero al carbono con uso de recubrimiento anticorrosivo.

## 3.2.2. *Selección de alternativas*

### 3.2.2.1. *Conjunto tanque de almacenamiento – eje de transmisión.*

- **Material:** El acero inoxidable es un material anticorrosivo por sí sólo, permite un ahorro económico ya que no es necesario invertir en un recubrimiento anticorrosivo, adicional a esto, debido a que no se usa un recubrimiento no se debe tener consideraciones especiales al momento de analizar el espesor de las planchas. Sin embargo, lo que se debe considerar es que el acero inoxidable requiere un espesor superior para soportar la misma presión que un acero al carbono. De la misma manera su costo es mucho mayor y su la capacidad de maniobra para manufactura es más dificultoso. Por lo tanto, el material con el que se trabajará será el acero al carbono con imprimante anticorrosivo.
- **Techo:** El uso de cualquier tipo de techo elevaría el costo de manufactura de manera innecesaria ya que para el funcionamiento óptimo de un tanque lixiviador es necesario que la pulpa tenga la capacidad de captar oxígeno de la atmósfera. Por lo que el diseño contempla no utilizar ningún techo.
- **Fondo:** Los fondos planos permiten una mayor facilidad de ensamble, adicional su manufactura es más sencilla y su costo de fabricación menor. Por lo que esta es la opción que se eligió.

- **Eje de transmisión:** los ejes de transmisión concéntricos dentro del tanque son típicos para agitadores, ya que el eje de transmisión lateral o excéntrica provoca tensiones elevadas sobre el eje. Por lo tanto, se trabajará con una eje de transmisión concéntrico.

#### 3.2.2.2. Sistema de transmisión

- **Configuración:** una conexión directa al eje de accionamiento requiere un motor de baja velocidad, pero los motores multipolares son más caros. Encontrar un motor a esta velocidad también es difícil. Una caja de cambios simple (una etapa - tipo tornillo) con correa y poleas tiene un diseño más práctico y fácil de montar, pero esta configuración no es muy eficiente energéticamente y requiere dinámica. El motor tiene más capacidad y potencia de la que necesita. El consumo aumenta durante usar. Por eso se eligió una caja de cambios de varias velocidades, ya que es más eficiente y puede alcanzar la velocidad requerida ( de hasta 600 rpm) sin necesidad de un motor más grande.

#### 3.2.2.3. Acoplamiento

- **Configuración:** Cualquier opción presentada es factible.
- **Material:** Debido a que este elemento es de menores dimensiones, la diferencia de costos no es mucha con referencia al de acero al carbono con recubrimiento. Se escogió acero inoxidable.

### 3.3. Diseño de componentes

El equipo presentado en el siguiente trabajo de integración curricular consta de las siguientes características:

Posee una forma cilíndrica, es decir es un tanque agitador cilíndrico vertical, construido en acero inoxidable, cuya parte superior esta abierta, previsto de un motor monofásico, el cual funcionará con una intensidad de corriente de 220V. Esta acoplada al motor un eje sólido de acero, el cual a su vez esta provisto de una paleta para agitación. El fondo tiene forma plana, esto con el fin de eliminar zonas muertas a la acción del agitador, también es muy esencial esta parte del diseño para la descarga completa del producto. la parte inferior, esta provista de un niple con llave manual la que servirá de descarga del producto. (Neira, S. & Trigota, J. 2013).

Para diseñar el equipo se debe tener en cuenta la aplicación que realizará, siendo esta la lixiviación de metales. Por lo que dentro del diseño se debe considerar variables como:

- **Tiempo de Operación**, ya que es un factor, debido a que dicho equipo servirá como módulo de ensayo y enseñanza a pequeña y media escala dentro de la planta piloto de mineralogía e la Facultad de Ciencias, y teniendo en cuenta los cálculos que se han realizado, el tiempo ideal será determinado en cada uno de ensayos dependiendo el mineral, sin embargo, el equipo considera su funcionamiento continuo en un rango de 10 minutos a 5h.
- **Diámetro del Tanque**, el cual permitirá determinar el volumen de la solución y la masa del soluto a utilizar. Los diámetros son calculados teniendo como referencia de que el equipo será un módulo de de la planta piloto.
- **Material usado en la construcción del equipo**, para esto se considera el espesor del material y las condiciones antioxidantes del mismo.
- **Características físicas de la solución a tratar**, en donde la característica principal que se tiene en cuenta para el diseño y construcción del equipo es la viscosidad de la solución sólido – líquido; y el pH de la solución lixiviantes, siendo esta la que definirá el tipo de agitador a elegir y así poder determinar sus dimensiones.
- **Dimensiones del agitador**, según las proporciones geométricas para un sistema de agitación normal, el cual trabaja con líquidos newtonianos contenidos en recipientes cilíndricos, deben obedecer a las siguientes relaciones matemáticas.

$$\frac{D_a}{D_t} = 0.25 \text{ a } 0.60 \quad (17)$$

$$\frac{B}{D_t} = 0.3 \text{ a } 0.50 \quad (18)$$

$$\frac{W}{D_a} = 0.25 \text{ a } 0.45 \quad (19)$$

$$\frac{L}{D_a} = 0.25 \text{ a } 0.35 \quad (20)$$

$$\frac{J}{D_t} = 1/10 \text{ a } 1/12 \quad (21)$$

- **La solución que utilizaremos en el mencionado trabajo**, tendrá una viscosidad menor a 300 cp. (0.3Pa.s). El tipo de agitador a emplearse será un agitador helicoidal de aspas acoplado mediante un eje al motor eléctrico.

- **Potencia consumida en la agitación**, ya que es un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación ya que es la potencia necesaria para mover el impulsor. Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia. la presencia o ausencia de turbulencia. El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido ( $\rho$ ) , su viscosidad ( $\phi$ ). la velocidad de rotación y el diámetro del impulsor. (Neira, S. & Trigota, J. 2013).

### **3.3.1. Análisis de la materia prima**

La materia prima con la que se va a trabajar es un mineral de calcopirita proveniente de las minas de Portovelo en la provincia de El Oro. Este mineral, cuenta con material grueso y material fino; para el caso de la calcopirita gruesa, la cinética de lixiviación se puede describir mediante el modelo de núcleo sin reaccionar y se encuentra controlada por difusión en la ceniza. Sin embargo, no existe una relación directa entre la velocidad de lixiviación y el aumento de la concentración de  $H^+$  en la solución lixiviantes.

Para el caso de la calcopirita fina, la cinética de lixiviación no se ajusta al modelo simple de núcleo sin reaccionar. Además, existe una relación directa entre la velocidad de lixiviación y el aumento de la concentración de  $H^+$  en la solución lixiviante. Considerando esto, el tamaño de partícula con el que se trabaja para el desarrollo del trabajo de integración curricular es de malla #80 (177 $\mu$ m), ya que es un tamaño que contiene material fino y grueso beneficiando la eficiencia de la lixiviación. (Álvarez M., 2012)

### **3.3.2. Diseño del tanque**

#### **3.3.2.1. Cuerpo del tanque (Shell)**

- **Selección de Material**

API 650 - Sección 4.4 enumera varios materiales A.S.T.M que deben usarse en situaciones dentro de los límites establecidos. Por otro lado, en el mercado local estos materiales se comercializan solo parcialmente y se comparan sus propiedades:

**Tabla 3-1:** Cuadro comparativo de composición química.

Material	Composición Química (%)				
	C	Mn	P	S	Si
A238	0.24	0.9	0.035	0.04	0.4
A36	0.25	-----	0.04	0.05	0.4
A131	0.21	0.52	0.035	0.035	0.5

Fuente: (ASTM A283 Gr. C, ASTM A36 & ASTM A131 Gr. A – 01, 2001)

Al observar su composición química se puede calcular la soldabilidad de estos mediante el uso del parámetro carbono equivalente (C.E):

$$C.E. = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} \quad (22)$$

- A283 = 0,40 %
- A36 = 0,27 %
- A131 = 0,32 %

De esto se deduce que el material que tiene mejor soldabilidad es el A36. Además, se comparó las propiedades mecánicas de los materiales en la siguiente tabla:

**Tabla 3-2:** Cuadro comparativo de composición química.

Material	Esfuerzos de fluencia (Mpa)	Esfuerzo de tracción
A283	205	380 – 515
A36	250	400 – 550
A131	235	400 – 520

Fuentes: (ASTM A283 Gr. C, ASTM A36 & ASTM A131 Gr. A – 01, 2001)

A pesar de ser acero A36 la mejor opción, vale la pena señalar que los tres tienen propiedades similares. Sin embargo, la resistencia del A36 es ligeramente superior. Por lo tanto, preferimos el acero A36.

### • Diseño de la forma

Para determinar el volumen efectivo del nuevo tanque, el flujo entre unidades disponibles, tráfico esperado y tiempo de actividad de residencia dentro del tanque de lixiviación.

El tiempo de retención es:

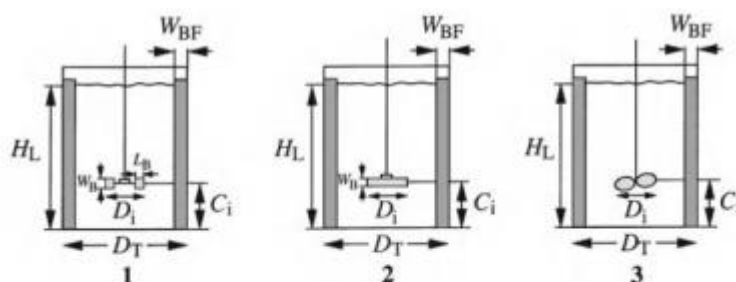


$$t_{ret} = Vol_{Tef} / Q_{cir} \quad (23)$$

Donde:

- $Vol_{Tef}$  = Volumen total efectivo de la pulpa ( $m^3$ )
- $Q_{cir}$  = Flujo de circulación de la pulpa en el circuito ( $m^3/h$ )
- $t_{ret}$  = Tiempo de retención de la pulpa en el circuito (h)

La literatura relaciona  $dq$  con el tanque de agitación se muestra como referencia la relación entre el diámetro y la altura del tanque inicial es de 1:1. Por ejemplo, (Doran, 2013) establecen la siguiente figura.



Impeller	$D_i/D_T$	$H_L/D_T$	$C_i/D_T$	Baffles	
				$W_{BF}/D_T$	Number
1. Rushton turbine $w_B/D_i = 0.2, L_B/D_i = 0.25$	0.33	1	0.33	0.1	4
2. Pitched-blade turbine $w_B/D_i = 0.125, 6$ blades, $45^\circ$ , downward pumping	0.33	1	0.33	0.1	4
3. Marine propeller 3 blades, pitch = $D_i$	0.33	1	0.33	0.1	4

**Ilustración 3-1:** Semejanzas geométricas para diversos tipos de impulsores

Fuente: Doran, 2013

En la ilustración se puede observar una relación geométrica específica para varias partes del tanque. Entonces es posible determinar, el tamaño aproximado del tanque.

Este trabajo está basado fundamentalmente en la experimentación. A escala de laboratorio se ha estudiado el comportamiento del proceso de lixiviación en volúmenes inferiores a 1L de solución lixivante. A partir de esto se ha intentado obtener unos rangos de operación óptimos y unas condiciones de trabajo adecuadas para aumentar la productividad del producto deseado, a una escala de planta piloto.

Dentro de la construcción del equipo de lixiviación, el tanque es alimentado de forma discontinua, y tiene contacto directo con el aire. Para las plantas pilotos es recomendable trabajar con tanques de lixiviación con volúmenes que corresponden entre 25L y 60L, sin embargo, dentro de los

ensayos desarrollados se recomienda trabajar al menos al 50% del volumen total del equipo para que la agitación dentro del tanque genere una solución de características homogéneas dentro de todo el tanque de lixiviación.

El tanque debe ser construido de acero inoxidable, para evitar una posible corrosión por el uso de reguladores de pH en el sistema o de lixivaciones muy ácidas o básicas. Las condiciones óptimas de funcionamiento del tanque de lixiviación consideran la operación a temperatura ambiente y una agitación estándar dentro del mismo para conseguir una eficiente transferencia de materia y homogenización de la mezcla. Este tanque será de mezcla completa, es decir que su concentración en el interior es igual a la de salida. (Farith Caballero, M. A., & Jaramillo Vargas, C. A., 2004) Para este trabajo, considerando se ha definido como volumen total del equipo a 50L en donde se trabajará con ensayos de al menos 25L de solución lixiviante.

$$\frac{H_L}{D_T} = 1 \quad (24)$$

$$H_L = D_T \quad (25)$$

$$V_{tanque} = \frac{\pi * D_T^2}{4} * H_L \quad (26)$$

Reemplazando 13 en 14:

$$V_{tanque} = \frac{\pi * D_T^3}{4} \quad (27)$$

Donde:

$V_{tanque}$  = Volumen del tanque = 50 litros = 50000 cm<sup>3</sup>

$D_T$  = Diámetro del tanque (m)

$H_L$  = Altura del fluido en el tanque (m)

Se presentan las ecuaciones correspondientes para determinar el Volumen del tanque:

$$V_{tanque} = \frac{\pi * D_T^3}{4} \quad (28)$$

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{V_{tanque} * 4}{\pi}} \quad (29)$$

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{50000 \text{ cm}^3 * 4}{\pi}} \quad (30)$$

$$D_T = 39.92 \text{ cm} \cong 40 \text{ cm} \quad (31)$$

Se determina también la altura del tanque:

$$h = \frac{V_T}{D_T^2} \quad (32)$$

Donde:

h= altura del tanque

$$h = \frac{5000 \text{ cm}^3}{40^2 \text{ cm}^2} \quad (33)$$

$$h = 51.25 \text{ cm} \cong 52 \text{ cm} \quad (34)$$

Por convención los tanques de almacenamiento son denotados por números enteros: 15'x15', 20'x20', etc. (en sistema ingles) o 4x4 (m), 6x6 (m), etc. (sistema métrico). Un 62,5% de su capacidad máxima y el 37,5% restante son de espuma.

Finalmente, se presentan las ecuaciones para encontrar la altura del fluido en el tanque

$$H_L = \% * h$$

$$H_L = 0.625 * 32$$

$$H_L = 20 \text{ cm} \quad (35)$$

- **Espesor de la pared**

Con base a las normas API 650, las paredes del tanque deben cumplir principalmente estas características:

- Para diámetros de tanque menores que 15 m, el espesor será como mínimo 5mm.
- El espesor seleccionado para cada nivel deberá ser el mayor entre el espesor calculado por prueba hidrostática y el espesor de diseño.
- El espesor será calculado sobre la base de que el tanque está lleno a un nivel HL (Altura de fluido), cuya gravedad específica es conocida.

$$\text{Cuerpo } t = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} \quad (36)$$

Donde:

Cuerpo t= Espesor de pared

P= Presión del diseño= 1 atm= 14,69595 lb/in<sup>2</sup>

R = Radio del tanque = 20 cm = 7,87402 in

S = Esfuerzo del material = 580.5779 lb/in<sup>2</sup>

E = Eficiencia de soldadura tabla 0,8

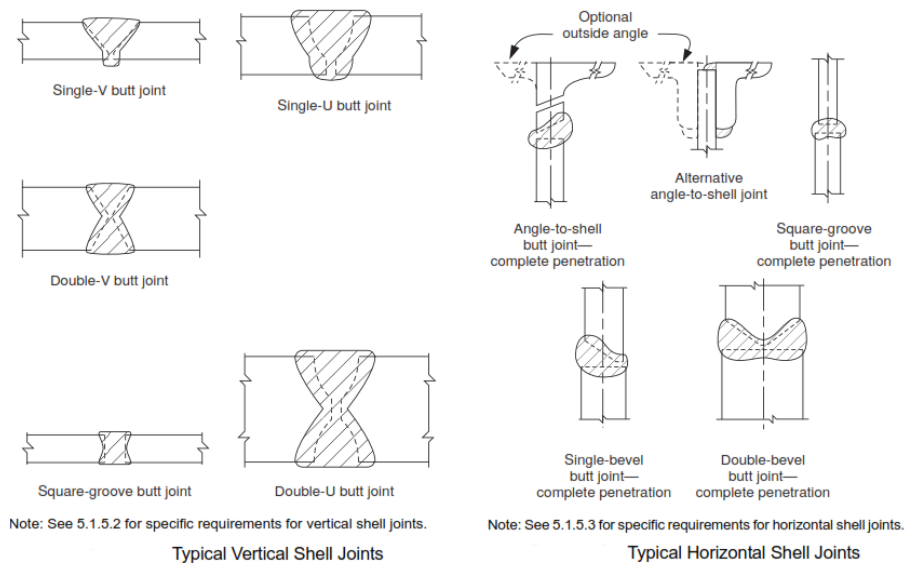
$$Cuerpo t = \frac{14,69595 \text{ lb/in}^2 * 7,87402 \text{ in}}{580,5779 \text{ lb/in}^3 * 0,8 - 0,6 * 14,69595 \text{ lb/in}^2} \quad (37)$$

$$Cuerpo t = 0,2539 \text{ in} \quad (38)$$

$$Cuerpo t = 0,64 \text{ cm} \cong 6,4 \text{ mm} \quad (39)$$

- **Forma constructiva de la pared**

Los tanques deben estar diseñados para todos los cables de soldadura como verticales, horizontales y paralelos al cuerpo. En el caso de una pared, se usa un paso utilizando un tipo diferente de telescopio sin un límite. Los sofisticados que otros tipos dependen del grosor utilizado. Esto debería ser una penetración e integración completas, como se muestra en la Ilustración. En este caso, use soldaduras de bisel en V de un lado para juntas horizontales y verticales.



**Ilustración 3-2:** Típicas juntas verticales y horizontales para el cuerpo del tanque.

Fuente: (API 650 12th Edition, 2013)

- **Fondo del tanque**

El estándar API 650 especifica que la placa inferior debe cumplir con estos requisitos característica:

El fondo debe estar soportado con hormigón o asfalto. Esto soportará el peso del producto.

Para diámetros de tanques superiores a 30 m, utilice placas anulares.

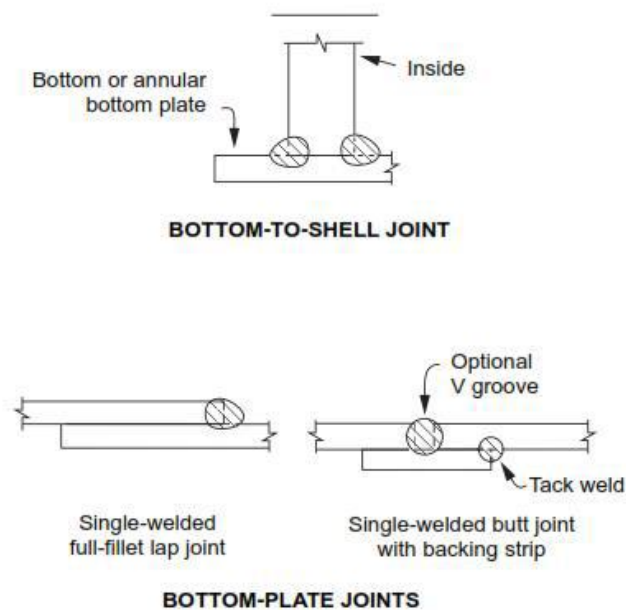
Suelen estar hechos de láminas más delgadas. Como su función es confinar el fluido, el cuerpo es un filtro y no se ve afectado por la presión hidrostática de los líquidos. Espaciador

El fondo debe ser más grande que el diámetro exterior.

Con base en lo anterior, API 650 recomienda verificar el espesor de la prueba de la presión hidrostática inicial del casco y espesor de fondo mínimo requerido. Se eligió un espesor de 6 mm porque el espesor de la prueba hidrostática es inferior al valor mínimo.

- **Forma constructiva del fondo**

Los paneles se unen de dos maneras: solape mediante soldadura de filete y unión a tope mediante soldadura de penetración total. La opción elegida fue la primera opción porque es fácil y económico de construir. Además de servir como conexión entre la pared y el fondo, es necesario que haya roscas en el interior del tanque para evitar la acumulación de líquido en las esquinas.



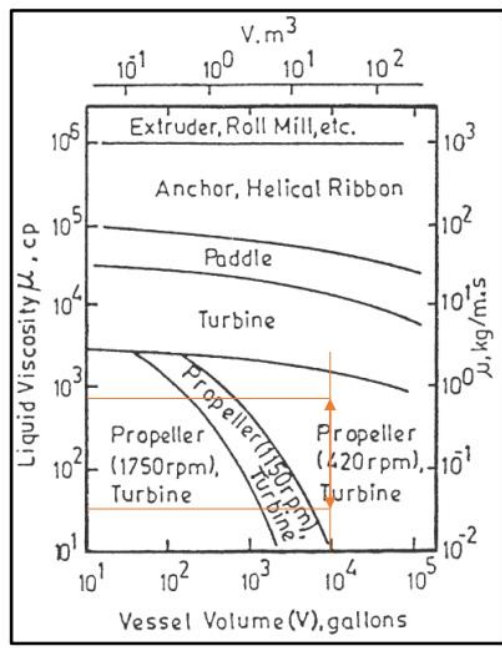
**Ilustración 3-3:** Junta del fondo con las paredes del tanque.

Fuente: (API 650 12th Edition, 2013)

### 3.3.2.2. Diseño del agitador

Para determinar el tipo de agitador, Penny (1970) propone la utilización de la siguiente ilustración donde se considera el volumen del tanque en el eje horizontal y viscosidad del fluido en el eje

vertical. Al interceptar el valor correspondiente para cada eje en un punto, se obtiene el tipo de agitador apropiado.



**Ilustración 3-4:** Selección del tipo de agitador

Fuente: Penny, 1970

Con los valores de viscosidad dinámica dados y el volumen del tanque (50L), se ingresa al gráfico y éste indica que, para el rango establecido en las especificaciones de diseño, se puede usar un agitador tipo hélice marina o un agitador tipo turbina.

Debido a su fabricación por fundición, una hélice marina se hace demasiado pesada cuando es grande. No se utiliza como agitador de entrada superior en tanques de un diámetro superior a cinco pies, sino como agitador de entrada lateral. (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Por ende, se decidió utilizar un agitador tipo turbina ya que generan un patrón de flujo mixto.



**Ilustración 3-5:** Modelo de hélice turbina Rushton

**Fuente:** Ekato group, s.f.

Ahora que se han determinado las dimensiones del tanque, se debe aproximar el valor de los componentes restantes del agitador, de acuerdo de las ecuaciones de Neira, S. & Trigota, J. (2013) presentadas previamente:

- Número de particiones = 6
- Ancho del escudo = 60 mm
- Distancia entre tapa y deflector = 6 mm
- Distancia desde la base hasta la rueda = 180 mm

#### 3.3.2.3. *Altura del agitador*

$$\frac{C_i}{D_T} = 0,33 \quad (40)$$

$$C_i = 0,33 * D_T \quad (41)$$

$$C_i = 0,33 * 40 \text{ cm}$$

$$C_i = 13,33 \text{ cm}$$

El resultado matemático no es adecuado para el diseño del tanque, por lo que, se aumentó el valor para cumplir con el sistema.

$$C_i = 36 \text{ cm}$$

#### 3.3.2.4. *Altura de la pala*

$$\frac{W_B}{D_i} = 0,2 \quad (42)$$

$$W_B = 0,2 * D_i$$

$$W_B = 0,2 * 20 \text{ cm}$$

$$W_B = 4 \text{ cm}$$

### 3.3.2.5. Largo mínimo de la pala

$$\frac{L_B}{D_i} = 0,252 \quad (43)$$

$$L_B = 0,25 * D_i$$

$$L_B = 0,25 * 20 \text{ cm}$$

$$L_B = 5 \text{ cm}$$

### 3.3.3. Cálculo de la potencia requerida

Los equipos necesitan eficiencia, la agitación debe lograrlo todo dentro del tanque y evitar así la turbulencia del líquido. Adicional se debe considerar el consumo de energía necesario para la resistencia controlada del fluido. Es importante cuantificar la cantidad de energía requerida para lograr esto. La potencia requerida es una función de varios parámetros:

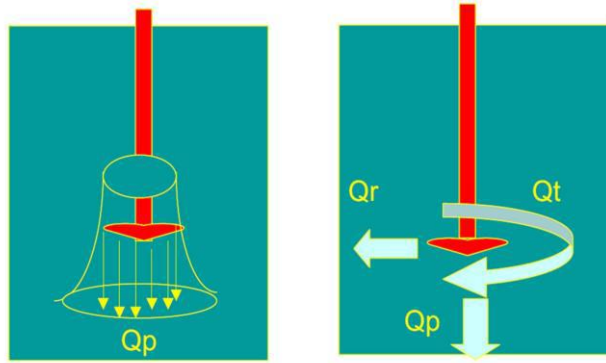
$$PM = f(d, D, H, \mu, \rho, \omega) \quad (44)$$

Donde:

- PM = Potencia requerida (kW)
- $d$  = Diámetro del impulsor (m)
- $D$  = Diámetro del tanque (m)
- $H$  = Altura del fluido (m)
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)
- $\rho$  = Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)
- $\omega$  = Velocidad angular del impulsor (rad/s)

Entre los parámetros anteriores, necesitamos determinar la velocidad angular de la hélice. Para encontrarlo, primero se determina la velocidad promedio del líquido, caudal de bombeo, caudal de succión y cauda total.





**Ilustración 3-6:** Esquema de caudales presente en agitadores.

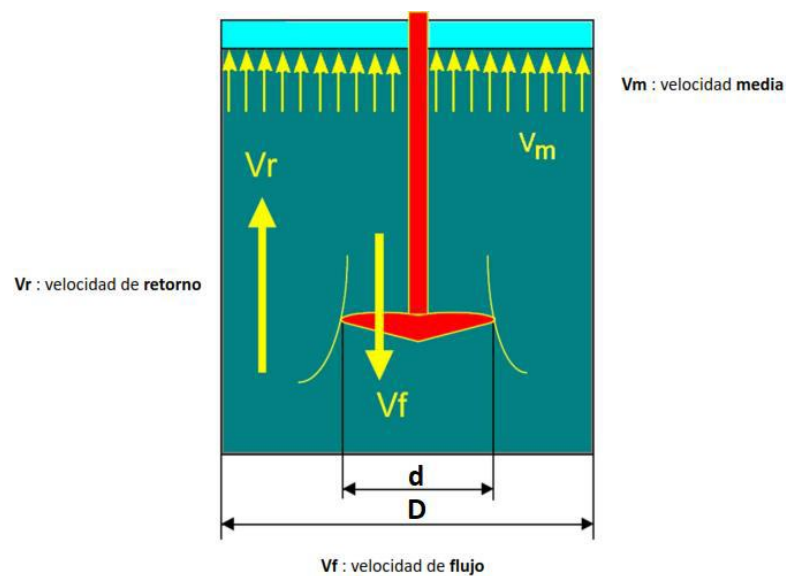
**Fuente:** Sistemas de dosificación y mezcla, 2014

La velocidad de la bomba ( $Q_p$ ) la produce principalmente el impulsor y está especialmente sobre el eje. La armadura ( $Q_r$ ) también se genera exhaustivamente por el impulsor, y es mucho más pequeño que los impulsores fabricados verticalmente. El caudal total ( $Q_t$ ) es un total de dos. La velocidad promedio del líquido se puede determinar a partir de la velocidad de la bomba y el área de la sección transversal del tanque.

$$v_m = Q_p / A_T \quad (45)$$

Donde:

- $v_m$  = Velocidad media del fluido (m/s)
- $Q_p$  = Caudal de bombeo del impulsor (m<sup>3</sup>/s)
- $A_T$  = Área de la sección del transversal del tanque (m<sup>2</sup>)



**Ilustración 3-7:** Tipo de velocidades lineales en agitadores.

**Fuente:** Sistemas de dosificación y mezcla, 2014

Aquí usamos un valor llamado "Escala de agitación". Este valor clasifica el fluido agitado, dependiendo del trabajo a realizar y la fuerza de la agitación. Se presenta la tabla la cual permite cuantificar o al menos describir la intensidad de la agitación y darle escala típica.

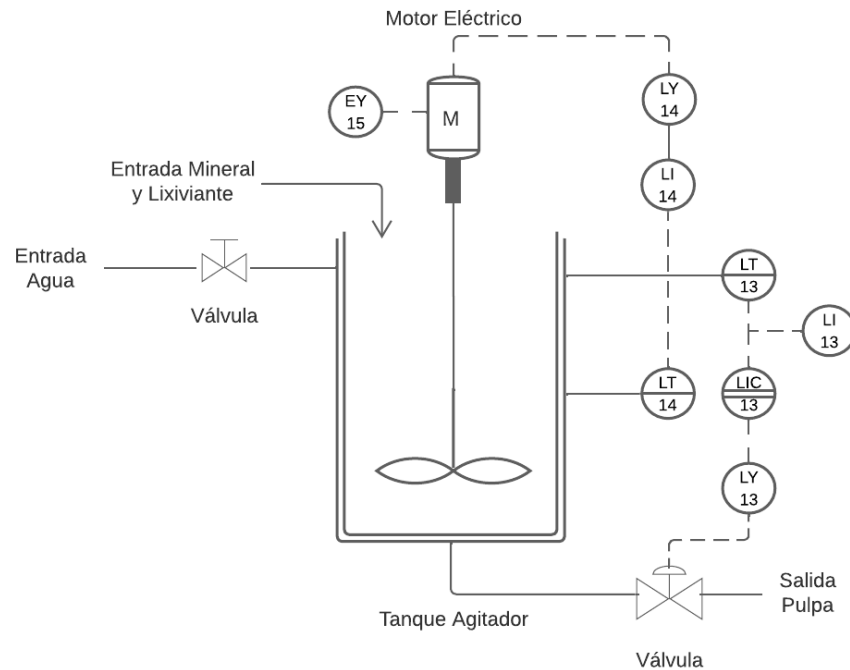
**Tabla 3-3:** Escala de agitación en recipientes de almacenamiento.

<b>ESCALA DE AGITACIÓN</b>			
<b>Escala de agitación</b>	<b>Velocidad media (m/s)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones Típicas</b>
1 2	0,03 0,06	Sin puntos muertos superficie plana, tiempos de mezcla largos.	Tanques de almacenamiento: mezcla suave de líquidos miscibles. Tanques de retención con largos tiempos de retención.
3 4 5 6	0,09 0,12 0,15 0,18	Los niveles 3-6 son característicos de la mayoría de las aplicaciones de industria química. Ondulación de la superficie a baja viscosidad. Tiempos de mezcla más cortos. Agitación leve a moderada.	La mayoría de los trabajos de mezcla. Tanques de retención y neutralización con tiempos de retención promedio. Aplicaciones fáciles de transferencia de calor. Reactores no críticos.
7 8 9 10	0,21 0,24 0,27 0,30	Los niveles 7-10 son característicos de las aplicaciones que requieren alto nivel de fluidez.  Tiempos de mezcla cortos.  Aumenta la baja viscosidad de la superficie	Reactores críticos. Neutralización y mezcladores rápidos con tiempo de retención corto.  Buena transferencia de calor

Fuente: Rass,2023

### 3.4. Diagrama P&ID

A continuación, se representa el proceso del equipo de agitación que se va a fabricar, todos los instrumentos que se tienen para el procedimiento, y el funcionamiento de estos en un sistema de control continuo de alta producción.



**Ilustración 3-8:** Diagrama P&D

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

### 3.5. Herramientas y máquinas

#### 3.5.1. Maquinaria Liviana

Máquina Soldadora para proceso GMAW - SMAW al considerar una estructura de acero estructural e inoxidable se usará en el proceso de unión de metales la soldadura bajo parámetros controlados de avance, voltaje y tasa de depósito para garantizar juntas mayores o iguales en términos de resistencia mecánica.

Herramientas convencionales de taller (taladros, martillos, alicates, destornilladores, etc).

Amoladoras, CNC de corte laser, máquinas de uso sencillo y eficaz para realizar destajes en elementos de perfilera estructural.

### 3.5.2. *Maquinaria Pesada*

**Roladora:** máquina de accionamiento mecánico encargada de rolar láminas de acero mediante fricción por rodillos, usada a partir del desarrollo de cálculo en el elemento de la envolvente del cuerpo cilíndrico del tanque agitador.

**Prensa de doblado:** máquina de accionamiento neumático capaz de realizar dobleces en secciones determinadas de lámina según el requerimiento de diseño.

**Compresor de aire:** maquinaria de accionamiento mecánico mediante un motor de combustión interna genera presión en un tanque que almacena aire dentro del tanque compresor, con el cual se alimentan líneas de presión neumáticas para pistolas neumáticas o para pistolas de pintura.

**Fresadora:** maquina industrial de accionamiento eléctrico mecánico capaz de generar agujeros y destajes en elementos de transmisión de potencia como árboles y ejes mecánicos como en otros elementos de máquinas.

**Torno:** maquina industrial de accionamiento eléctrico mecánico capaz de generar elementos de transmisión de potencia a través de la revolución de la materia prima y la fricción de cuchillas de corte que generan formas y geometrías requeridas según el diseño.

## 3.6. Tareas realizadas por cada componente

### 3.6.1. *Agitador*

Este elemento se encarga de la dinámica durante el proceso de lixiviación, en el cual podemos encontrar una mezcla del lixivante y el mineral. Con el fin de obtener burbujas de aire lo que produce en la pulpa una separación de los minerales valiosos. El objetivo del agitador es obtener una mezcla perfecta entre aire, agua y los reactivos que se ingresen para producir la mayor cantidad de burbujas de agua.

La lixiviación por agitación se utiliza en los minerales de leyes altas y cuando los minerales generan un alto contenido de finos en la etapa de chancado y cuando el mineral deseado está tan bien diseminado que es necesario molerlo para liberar sus valores y exponerlos a la solución lixivante. Es también el tipo de técnica que se emplea para lixiviar calcinas de tostación y concentrados,

Se recurre a la agitación mediante burbujeo o bien a la agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se logra la disolución completa, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas comparado con el proceso de lixiviación en pilas que requiere meses. Los agitadores mecánicos son simplemente impulsores colocados en el interior del tanque mientras que los tanques agitados con aire son a menudo tanques de tipo Pachuca. (Becerra Camila et al., 2015)

### **3.6.2. Motor**

Es el encargado de transmitir el movimiento de agitación al fluido de la mezcla, mediante la transformación de energía eléctrica en energía mecánica, debido a que la mezcla es en gran parte sólida, se requiere una potencia considerable para poder realizar adecuadamente el proceso de agitación de los elementos a procesar mediante la lixiviación, tomando en cuenta además, que se requiere un valor mayor de torque de entrada debido a la densidad promedio de la mezcla entre el lixivante y el mineral. Debido a que el equipo utilizará velocidades entre las 150 y las 600rpm, un motor entre ½ y 1Hp debido a que no existen grandes fuerzas en el proceso y por ende no se necesita un mayor esfuerzo

### **3.6.3. Tanque**

En el tanque de lixiviación se producen las colisiones entre las partículas del mineral que ingresan, el agente lixivante y el agua. Al inicio del proceso de agitación dentro del tanque se puede observar que existe la unión de las partículas con los fluidos ingresados, que con la ayuda del aire se produce una adhesión. Luego se produce una mezcla homogénea contenida en el tanque lo cual permite que el agente reaccione con el mineral de mejor manera y así obtener un mayor volumen de solución rica

## **3.7. Validación del equipo**

De acuerdo con la revisión bibliografía, se realizó de manera teórica y experimental pruebas de lixiviación, como el tiempo de reposo de la muestra en el tanque de agitación y el porcentaje del mineral recuperado y el rendimiento del equipo. Una vez obtenidas las muestras, se realizó en el laboratorio de operaciones unitarias de la ESPOCH, un pretratamiento al mineral de mina como: secado, triturado, molienda, tamizado, para finalmente colocar en el equipo lixivador.

El equipo lixivador que se diseñó consta de un tanque agitador, sencillo con recirculación constante de la pulpa, con capacidad de 5 - 10 kg. Es importante mencionar, que para obtener un

mayor rendimiento de recuperación de los minerales valiosos se empleó ciertas sustancias o reactivos acorde al tamaño de alimentación del equipo y el tiempo de reposo. Dentro de los reactivos se tiene ácido sulfúrico, el cual presenta propiedades colectoras de minerales como oro, plata, cobre, etc., (Cuenca, 2018, p.33).

### **3.7.1. *Proceso de validación***

Con base a los cálculos desarrollados y los reactivos seleccionados, se tiene el siguiente procedimiento:

- Se secó el mineral de la mina
- Se redujo su tamaño y homogenizar el tamaño de partícula
- Se tomó 5 Kg de la muestra
- Se tamizo por una malla #80
- Se midió la densidad y el pH.
- Se alimentó el equipo lixiviador con 5 Kg de muestra y 20 L de solución lixivante
- Se encendió el equipo a 600 rpm, para regular la velocidad angular en el panel de control se encuentra la perilla del frecuencímetro.
- Se verifico la velocidad
- Se midió el pH de la pulpa.
- Se esperó el tiempo de acondicionamiento del mineral
- Se detuvo el agitador luego de 60 minutos
- Se esperó que el material descartable o colas sedimentaran.
- Se extrajo una alícuota de 500 mL de solución
- Se secó la alícuota durante 48 h a 80 °C
- Se analizó las muestras generadas.

### **3.7.2. *Datos experimentales***

El mineral de mina que se obtuvo mantiene un peso de 5 kg para el proceso de lixiviación en el tanque agitador.

#### **3.7.2.1. *Dosificación de reactivos***

De acuerdo con bibliografía, se establece que para alcanzar la mayor eficiencia dentro del proceso de lixiviación se debe trabajar con al menos el 40% del volumen del tanque de agitación ya que esto permite tener una solución homogénea dentro del mismo producto de la agitación.

Dicho esto, dentro del tanque diseñado se puede trabajar con una cantidad mínima de 5kg de mineral calcopirita y 20L de solución lixivante para sobrepasar los 20L de capacidad del tanque y de esta manera asegurar una agitación constante y homogénea. A continuación, se presentan los cálculos para establecer la cantidad de mineral a tratar y la cantidad de ácido sulfúrico dentro de la solución lixivante.

- Mineral Calcopirita

$$5kg \text{ Calcopirita} \times \frac{1000g \text{ Calcopirita.}}{1kg} \times \frac{1mL}{4.3g \text{ Calcopirita}} \times \frac{1L \text{ Calcopirita}}{1000 mL} = 1.16L \quad (46)$$

La densidad de la calcopirita es de 4.3kg, por lo que se puede trabajar con una cantidad de mineral mínima de 5kg que equivale un volumen entre 1.16L.

- Ácido sulfúrico

La solución lixivante para la recuperación de cobre, de acuerdo a bibliografía está entre el 5% y el 40% en peso, Considerando esto, se determinó trabajar con una concentración de 10% en peso para la solución lixivante. Para esto, fue necesario la preparación de la solución, dentro del laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH se cuenta con ácido sulfúrico concentrado al 98% en volumen.

Para poder determinar el volumen necesario para la preparación de la solución lixivante se consideró que la densidad del ácido sulfúrico al 10% en peso es de 1.11 g/mL, mientras que la densidad del ácido sulfúrico al 98% en volumen es de 1.83 g/mL . Con esto se determinó que el volumen que debe ser disuelto en 20 L de agua para la creación de la solución lixivante es de 1.21L de ácido concentrado. Se utiliza 20L de solución lixivante ya que la capacidad del equipo es de 50L y para que sea eficiente el proceso al menos debe estar llenado a un 40% de su capacidad es decir sobre los 20L.

$$20L \text{ solución Lixivante} \times \frac{1000mL \text{ sol.lixi.}}{1L \text{ sol.lixi.}} \times \frac{1.11g \text{ sol.lixi.}}{1ml \text{ sol.lixi.}} \times \frac{10 g H_2SO_4}{100 g \text{ sol.lixi.}} \times \frac{1 mL H_2SO_4}{1.83 g H_2SO_4} \times \frac{1l H_2SO_4}{1000 mL H_2SO_4}$$

(47)

$$= 1.21 L \text{ de Ácido sulfúrico Concentrado}$$

- Solución Final

El volumen final con el que se trabajó en el tanque fue de 21.6L ya que fue la suma de la solución lixiviante y el mineral pulverizado. Al tener un volumen superior a los 20L se garantiza trabajar sobre al menos el 40% del volumen final del tanque y de esta manera tener una solución homogénea dentro del tanque de lixiviación.

### 3.7.2.2. Balance de masa de la recuperación

El mineral con el que se trabaja fue analizado para determinar la composición química a partir de la técnica XFR. La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos. La fluorescencia de rayos X también se utiliza para determinar el espesor y la composición de capas y recubrimientos. Esta puede analizar elementos desde berilio (Be) hasta uranio (U) en gamas de concentración de un 100 %p a niveles sub-ppm. Se presenta la composición del mineral en la siguiente tabla:

**Tabla 3-4:** Composición Química del mineral calcopirita mina Portovelo

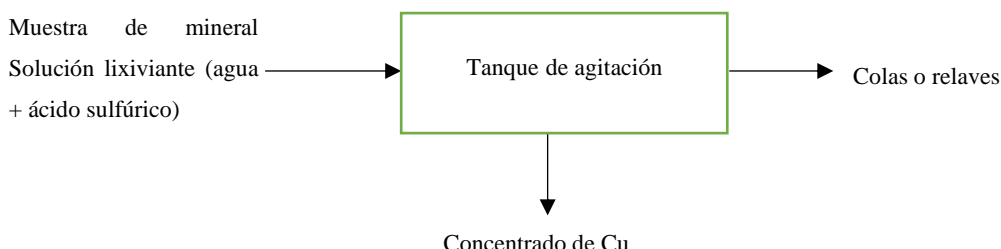
ANÁLISIS QUÍMICO - XRF			MUESTRA 1
Óxidos		Composición	M-1
Dióxido de Silicio	SiO <sub>2</sub>	%	5,24
Óxido de Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,05
Óxido de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	28,45
Óxido de Sodio	Na <sub>2</sub> O	%	0,18
Óxido de Calcio	CaO	%	0,32
Óxido de Magnesio	MgO	%	0,53
Óxido de Potasio	K <sub>2</sub> O	%	0,00
Óxido de Titanio	TiO <sub>2</sub>	%	0,24
Óxido de Cobre	CuO (%)	%	12,18
Óxido de Cromo	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	%	0,01
Anhidrido Fosfórico	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,00
Anhidrido Sulfúrico	SO <sub>3</sub>	%	38,60
Óxido de Níquel	NiO (%)	%	0,02
Óxido de Zinc	ZnO (%)	%	0,79
Pérdidas por calcinación (L.O.I. 950°C)		%	10,38

Fuente: UCEM, 2023



Como se observa el contenido de CuO en la muestra es de 12.18%, por lo que se trata de un mineral de alta ley de Cobre, y permite trabajar con una lixiviación por agitación en un tanque.

Se presenta a continuación el balance de masa dentro del tanque de lixiviación:



**Ilustración 3-9:** Diagrama del balance de masa de la recuperación de cobre

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

Considerando que el porcentaje de CuO es del 12,18% se realizaron los cálculos para determinar la cantidad de cobre presente en la muestra

$$5000kg \text{ mineral} \times \frac{12.18g \text{ de CuO}}{100g \text{ mineral}} = 609g \text{ CuO} \times \frac{63.5g \text{ Cu.}}{79.5g \text{ CuO.}} = 486,44g \text{ Cu} \quad (48)$$

Se observa que de los 5000kg de mineral 606 g son de óxido de cobre II, es decir 609kg. De estos 609 kg, y considerando la relación entre el peso molecular del CuO y el peso atómico del Cu, la cantidad de Cu que se puede disolver es de 486,44g.

Finalmente, se realizó el análisis de XFR de la solución preñada de la lixiviación, el mismo que se presenta a continuación:

**Tabla 3-5:** Composición Química del concentrado de Cu

ANÁLISIS QUÍMICO – XRF			MUESTRA 2
Óxidos		Composición	M-1
Dióxido de Silicio	SiO <sub>2</sub>	%	5,24
Óxido de Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,05
Óxido de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	28,45
Óxido de Sodio	Na <sub>2</sub> O	%	0,18
Óxido de Calcio	CaO	%	0,32
Óxido de Magnesio	MgO	%	0,53
Óxido de Potasio	K <sub>2</sub> O	%	0,00
Óxido de Titanio	TiO <sub>2</sub>	%	0,24

<b>Óxido de Cobre</b>	CuO (%)	%	0,94
<b>Sulfato de Cobre</b>	CuSO <sub>4</sub> (%)	%	11,86
<b>Óxido de Cromo</b>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	%	0,01
<b>Anhidrido Fosfórico</b>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,00
<b>Anhidrido Sulfúrico</b>	SO <sub>3</sub>	%	38,60
<b>Óxido de Níquel</b>	NiO (%)	%	0,00
<b>Óxido de Zinc</b>	ZnO (%)	%	0,79
<b>Pérdidas por calcinación (L.O.I. 950°C)</b>		%	10,40

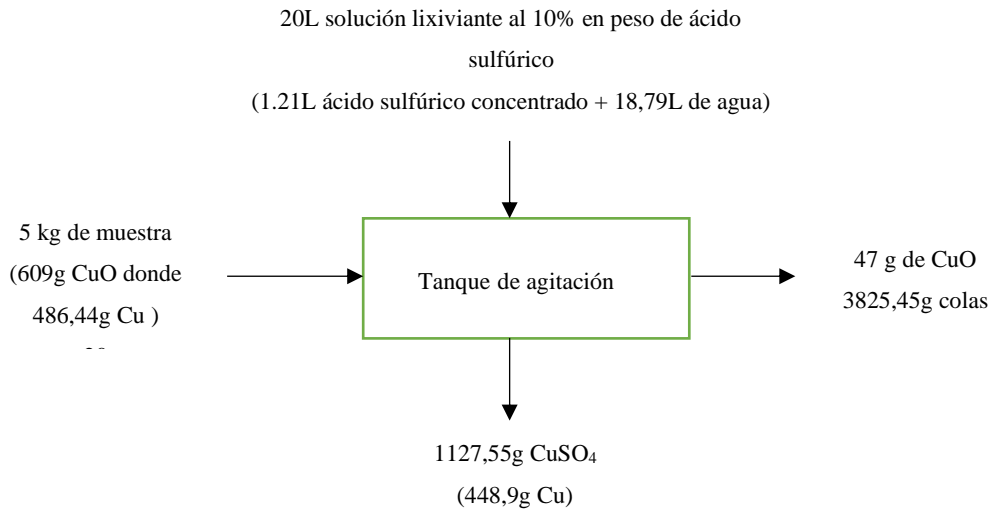
Fuente: UCEM, 2023

Como se observa, el Cu se ha disuelto para concentrarse en forma de sulfato, el mismo que posteriormente puede ser depositado a partir de la cementación de cobre con hierro. Del 12,18% que existía de CuO, ahora se presenta un 0.94% del mismo compuesto y se ha generado un 11.86% de sulfato de cobre. A continuación, se detallan los cálculos para determinar la cantidad de gramos de Cu y de CuO que se encuentran al final del proceso de lixiviación.

$$609g \text{ CuO} \times \frac{0.94}{12.18} = 47g \text{ CuO} \times \frac{63.5g \text{ CuO}}{79.5g \text{ CuO}} = 37,54 g \text{ Cu} \quad (49)$$

$$\text{Cu disuelto: } 486,44g \text{ Cu total} - 37,54g \text{ Cu no disuelto} = 448,9g \text{ Cu} \times \frac{159.5g \text{ CuSO}_4}{63.5g \text{ Cu}} = 1127,55 g \text{ CuSO}_4 \quad (50)$$

Se observó que la cantidad de  $\text{CuSO}_4$  formado fue de 1127,55g, mientras que la cantidad de CuO sobrante es de 47g, y que finalmente las colas tienen un peso de 38825,45g, donde se encuentra el material inerte.



**Ilustración 3-10:** Balance de masa de la recuperación

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

### 3.7.2.3. Eficiencia del proceso

$$\%E = \frac{\text{rendimiento experimental } g}{\text{rendimiento teórico } g} * 100 \quad (51)$$

$$\%E = \frac{\text{salida de Cu Disuelto } g}{\text{entrada de alimentación CuO } g} * 100 \quad (52)$$

$$\%E = \frac{448.9}{486,44} * 100$$

$$\%E = 92,28 \%$$

Para calcular la eficiencia de la lixiviación, se considera el Cu contenido en el sulfato de cobre II, formado, esto debido a que este es el valor de cobre disuelto, ya que posterior a la lixiviación, se podrá obtener el Cu a partir del proceso de cementación. Por tanto, al considerar el cobre presente en el sulfato respecto al cobre presente en el óxido se obtuvo el valor de la eficiencia del proceso, que para este equipo es del 92,28%.

## 3.8. Porcentaje de extracción de cobre

Para el porcentaje de extracción cobre se presentan las condiciones experimentales con las que se desarrolló la validación del equipo. Como se explicó en capítulos anteriores, el agente lixiviante será el ácido sulfúrico, el mismo que tiene una concentración volumétrica del 98%. Se trabaja con

esta concentración porque este es el reactivo con el que cuenta el laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

El equipo diseñado puede alcanzar velocidades comprendidas entre 150 y 600 rpm, durante el ensayo se trabajó a la máxima velocidad para así encontrar la máxima eficiencia del equipo. Al ser una lixiviación ácida, se debe controlar el valor del pH en un valor de 1 a 1.5, esta información se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 3-6:** Condiciones experimentales

Agente lixivante	Concentración	Rpm	pH	Control de pH en el tiempo
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98% VOL	600	1	Si

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

Finalmente, se determinó el porcentaje de Cu recuperado considerando, que la masa del mineral inicial fue de 5000g, donde para calcular la masa de CuO presente se considera la ley de Cu del mineral, el cual es 12,18%

$$\text{masa del mineral} = 5000 \text{ g}$$

$$\text{CuO inicial} = \frac{\text{masa del mineral} * \text{ley Cu}\%}{100}$$

Realizando los cálculos se determinó que el óxido de cobre inicial presente en el mineral fue de 609g,

$$\text{CuO inicial} = \frac{5000 \text{ g} * 12.18 \%}{100}$$

$$\text{CuO inicial} = 609\text{g}$$

Para calcular el porcentaje de recuperación de Cu, se considera el Cu disuelto presente en el sulfato respecto a la cantidad inicial de óxido de cobre

$$\% \text{ Cu Disuelto} = \frac{448.9\text{g}}{609\text{g}} * 100$$

$$\% \text{ extracción Cu} = 73,71\%$$

Finalmente, se calculó que el porcentaje de recuperación de cobre fue de 73,71%.

### 3.9. Técnicas para determinar la calidad del producto final

Una vez que se extrajo el material por el método lixiviación por agitación, el metal que se encuentra dentro de la solución preñada fue analizado para la determinación del contenido de cobre en concordancia con las normas técnicas INEN con el objetivo de cumplir cada uno de los parámetros requeridos para el producto final, como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 3-7:** Determinación del contenido de Cobre

Parámetro	Norma	Reactivos	Materiales
Contenido de Cobre	NTE INEN 1714	Óxido de Zinc	Equipo de fluorescencia de rayos X, matraces aforados y agua destilada.
<b>Procedimiento</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Pesar la muestra y disolverla en ácido clorhídrico, aforar a agua destilada 200 centímetros cúbicos.</li><li>• Con cada solución medir la absorbancia utilizando la lámpara de cátodo hueco, a longitud de onda de 324.8 nanómetros.</li><li>• Se obtendrá la pureza de la muestra comparando en una gráfica su absorbancia con absorbancias patrones.</li></ul>			

**Fuente:** INEN, 2013

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Resultados del dimensionamiento del equipo lixiviador

##### 4.1.1. Dimensionamiento tanque de agitación

Para realizar el proceso de lixiviación de cobre se diseñó y construyó un tanque de agitación para el laboratorio de mineralogía de la ESPOCH que consta de una capacidad de 50 litros de capacidad, la tabla 01-4 detalla los resultados del dimensionamiento.

**Tabla 4-1:** Resultado del dimensionamiento del equipo lixiviador

Especificación	Medida
Altura del tanque	52 cm
Diámetro del tanque	40 cm
Espesor de pared	0,64 cm
Diámetro de la turbina	20 cm
Altura del agitador	36 cm
Altura de la pala	4 cm
largo de la pala	5 cm
Velocidad de salida del agitador	150 - 600 rpm

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023

El equipo de lixiviación se construyó en acero estructural A-316, material que minimiza en gran cantidad los efectos de la corrosión. El equipo fue diseñado para trabajar a partir del 40% de su capacidad, es decir con volúmenes iguales o superiores a 20L, ya que a partir de este volumen el equipo logra generar una mezcla homogénea dentro del tanque y de esta manera se favorece la lixiviación

#### 4.2. Resultados de la validación del equipo

El ensayo que se realizó en el laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias generó los siguientes resultados, presentados en la tabla 2-4, como se observa, de los 5kg que ingresaron al equipo, 0,4489 kg de Cu salen en el concentrado, el mismo que se encuentra contenido en los 1.12755kg de sulfato de cobre. Finalmente se obtienen 3,872,45g de colas que incluyen los 47g de CuO con el cobre no disuelto.

#### 4.2.1. Balance de masa de recuperación

**Tabla 4-2:** Resultado del balance de masa de la recuperación

Muestra de entrada (kg)	5
Salida de concentrado de Cu (kg)	0,4489
Salida de Sulfato (kg(¿))	1,12755
Cola (kg)	3,872.45

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

#### 4.2.2. Resultado de eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia se consideró el cobre disuelto en forma de sulfato, y la cantidad de cobre presente en el óxido de cobre, de esta manera se obtuvo que la eficiencia del proceso de lixiviación fue del 92,28%

**Tabla 4-3:** Eficiencia del proceso y de la celda de flotación

Eficiencia del proceso %	92,28%
--------------------------	--------

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

#### 4.2.3. Resultado del % de extracción del cobre

Para la determinación del porcentaje de extracción de cobre se considera el cobre disuelto en forma de sulfato respecto a la cantidad de cobre presente en el mineral inicial en forma de CuO. Por lo que el % de extracción de cobre fue de 73,71%

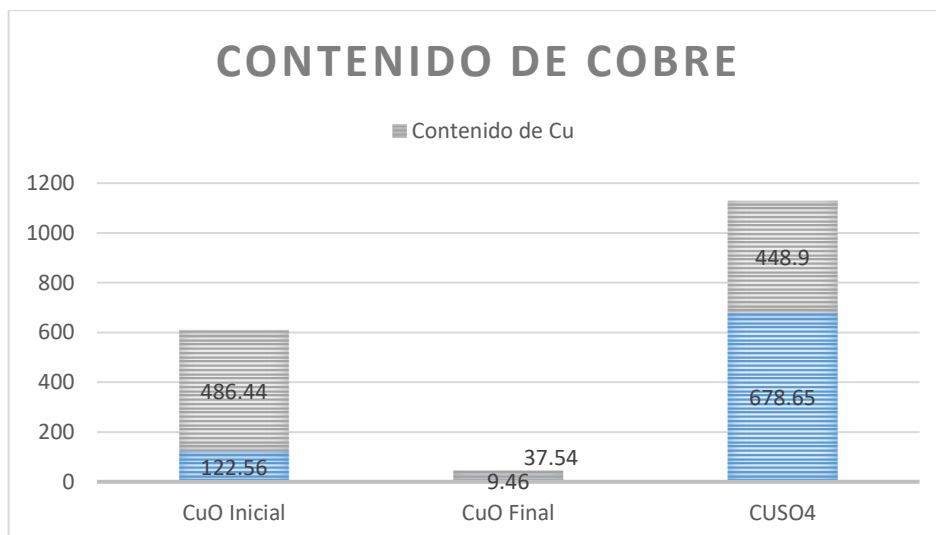
**Tabla 4-4:** Resultado de la cantidad de cobre disuelto

% Cu Disuelto	73,71%
---------------	--------

Realizado por: Arias, J. & Ormaza, D., 2023

#### 4.2.4. Contenido de Cu en muestras

Se presenta en la ilustración 1-4 la cantidad de cobre presente en las muestras inicial y final de CuO, así como en el sulfato de cobre recuperado después de la lixiviación.



**Ilustración 4-1:** Contenido de cobre en muestras del proceso de lixiviación

**Realizado por:** Arias, J. & Ormaza, D., 2023



## CONCLUSIONES

Se realizó el diseño y construcción de un equipo lixiviador por medio de un tanque de agitación para el laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, a través de este equipo se contribuyó a la planta piloto para la recuperación de materiales de mayor valor a partir de materiales de mina, en el que los estudiantes de la escuela de Ingeniería Química complementan los conocimientos adquiridos de manera teórica y se permite la relación del proceso más utilizado en la industria metalúrgica.

Se realizaron los cálculos de ingeniería mediante el dimensionamiento físico y mecánico para el equipo de lixiviación, en el que se destacó los parámetros como la alimentación del equipo de 5 kg de calcopirita con un volumen del equipo de 50L, se concluye que debido a las propiedades lixiviantes y a las condiciones del mineral para que se genera una fuerte separación del material de interés dentro del mineral de mina, y ocasionar la disolución de Cu dentro del CuO se debe trabajar al menos al 40% de capacidad.

La eficiencia del proceso de lixiviación fue del 92,23% ya que se liberaron 448,9 g de Cu en forma de sulfato respecto a los 486,28g de Cu presentes en el CuO, esta eficiencia es considerada como un valor aceptable dentro de los procesos metalúrgicos. El porcentaje de recuperación del cobre fue de 73,71% lo que significa que se recuperaron 448,9g de cobre en forma de sulfato en relación a los 609g de óxido de cobre presente en el mineral inicial de calcopirita, este porcentaje de recuperación dentro la metalurgia es considerada un valor aceptable

Se construyó el equipo con materiales de acero inoxidable A-316 con un espesor de 0,64 adecuado en base al diseño ingenieril, ya que, protege al equipo de posibles corrosiones por el contacto con el mineral y la solución lixivante. Dentro de las variables de diseño con que se trabajó fueron la velocidad de agitación ya que el proceso de lixiviación de cobre funciona a partir de una agitación estándar, y también el tamaño de partícula del material al lixiviar ya que la lixiviación de cobre se da un valor de 177 $\mu$ m o malla #80, ya que de esta manera se tiene un buen porcentaje de finos y de gruesos beneficiando la lixiviación.

## **RECOMENDACIONES**

Antes de utilizar por primera vez el equipo se deberá leer atentamente la totalidad del manual de instalación y funcionamiento, además para evitar futuros daños del equipo se deberá leer detenidamente el manual de mantenimiento y finalmente para que no existan accidentes en con los estudiantes mientras se realiza la maniobras con el equipo es de suma importancia leer el manual de seguridad.

Evitar manipular el panel de control con las manos mojadas cuando este se encuentre en funcionamiento ya que podríamos ocasionar corto circuitos, así como afectaciones a la salud del operario.

Evitar colocar recipientes con reactivos o sustancias ajenas al proceso dentro del tanque de lixiviación y el panel de control porque se puede provocar reacciones indeseables que puedan afectar al proceso.

Para futuras investigaciones se recomienda diseñar equipos automatizados para reducir tiempos operacionales, en la parte de dosificación de reactivos que contribuya a la eficiencia del proceso, , además se recomienda implementar un sistema para tratar el agua que resulta como residuo del proceso de lixiviación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**AGUILAR, M.** Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. *Research Gate Editum* (2002), pp. 37.

**ALVARADO, J. C., & SALVADOR, M.** Precipitación de fierro y manganeso secuencial de efluentes de drenaje ácidos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas.* (2021), pp. 41-46.

**ARAGÓN TOBAR, C.** Evaluación de la aplicación de disolventes eutécticos profundos basados en cloruro de colina para la lixiviación de metales (Cu, Pb, Fe y Zn) provenientes de un concentrado polimetálico. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador. 2022. pp. 107.

**BECKEL, J.** El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile. *Serie desarrollo productivo* [en línea], 2000. [Consulta: 18 de enero del 2023]. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4453/1/S00050422\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4453/1/S00050422_es.pdf)

**BRITO QUEZADA, C. R., & FAJARDO LLIVICURA, C. R.** Análisis de alternativas para la concentración gravimétrica de Cu y Ag en relaves de flotación. (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad del Azuay. Cuenca-Ecuador. 2019. pp. 154.

**BUGUEÑO, R.** Tipos y diseños de sistemas de almacenamiento de material. *Universidad de la Serena, Chile.* (2015), pp. 37-41.

**CEPEDA J.** Diseño y construcción de una máquina trituradora de capacidad 2,5 kg de polietileno de baja densidad reciclado. (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato. Ambato-Ecuador. 2016. pp. 87.

**CERVANTES GARCÉS, J.** Diseño de un tanque agitador de 160 m<sup>3</sup> de capacidad para lixiviación de oro. Consorcio Minero Horizonte S.A. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad Nacional del Callao, Perú. 2023. pp. 50-61.

**CUBAS VILLEGAS, C.** Diseño de planta de agitación para el tratamiento de relaves auríferos en la provincia de Sandia - Región de Puno (Trabajo de Titulación) (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna, Perú, 2022. pp. 187.

**DELVASTO, P.** Diseño de una planta piloto con tecnología sencilla y apropiable para el procesamiento de pilas y baterías gastadas con el objeto de reciclar níquel, cadmio y otros metales. *Universidad Simón Bolívar. Baruta, Edo. Miranda. Convocatoria a Proyectos Estratégicos.* [en línea], 2013. [Consulta: 21 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14721417/o-titulo-del-proyecto-diseno-de-una-planta-piloto-con-tecnologia->

**DOMIC, E.** Libro de Metalurgia Extractiva. [en línea], 2016. [Consulta: 11 de enero de 2023]. Disponible en: <http://www.ehu.es/ehusfera/materiales/files/2011/02/LA-BIOLIXIVIACION.pdf>[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/ingenie/nonalaya\\_s\\_c/cap3.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/ingenie/nonalaya_s_c/cap3.htm)

**ESPINOSA, L., & LÓPEZ ABURTO, V.** Teoría y práctica de trituración y molienda. vol. 1, no. 8 (1984), pp. 12–19.

**FARITH CABALLERO, M., & JARAMILLO VARGAS, C.** Diseño de una planta piloto para la producción de hidrogeno a partir de bioetanol para pilas de combustible. Universidad Industrial de Santander. 2004. pp. 97.

**GODOY, J & VALLE MOYA, A.** Diseño y construcción de una celda de flotación para la planta piloto de obtención de metales preciosos del laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ciencias. (Trabajo de Titulación). (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2022. pp. 87.

**HLCSISTEMAS.** ¿Qué es la lixiviación en minería? 2020. [blog]. [Consulta: 10 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.hlcsac.com/noticias/que-es-la-lixiviacion-en-mineria/>

**HUI, L., et al.** Process mineralogy approach to optimize curing-leaching in vanadium-bearing stone coal processing plants. *International Journal of Mining Science and Technology* [en línea]. 2022. [Consulta: 22 de enero de 2023]. ISSN 2095-2686. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.08.002>.

**JUÁREZ MATA, R.** Modelado de un reactor de lixiviación para el proceso de extracción de metales contenidos en minerales de baja ley. (Trabajo de Titulación). (Maestría). Universidad Autónoma Metropolitana, México. 2013. pp. 100.

**LOPEZ, A., et al.** Efecto de la granulometría en flotación, Universidad Católica del Norte. *Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas.* (2018), pp. 65. ISSN 2588-0594

**MAMANI GOZME, A.** Lixiviación de minerales finos oxidados de cobre. vol. 1, no.2 (2019), pp. 2-6. ISSN 0120-0178

**MALBRÁN, L.** Explotación minera y refinación de cobre. S.l.: s.n. 2020. pp. 3-15.

**MCCANN, M.** Metalurgia y metalistería. 2019. [blog]. [Consulta: 12 de diciembre de 2023]. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+82.+Metalurg%C3%ADa+y+metalisteria>

**MÁLAGA, J.** Evaluación del diseño estructural de un sistema tanque-plataforma de lixiviación de 3336m<sup>3</sup> de capacidad. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. 2014. pp. 112

**MIRANDA, J.** Breve historia del surgimiento de la tecnología hidrometalúrgica del proceso de lixiviación carbonato-amoniaco del Ni y Co. [en línea]. 2014. [Consulta: 20 de enero de 2023]. ISSN: 0041-8420.

**PARDO, M.** Plan de mantenimiento preventivo para los equipos de producción, en planta de lixiviación Compañía Minera Doña Gloria SAC, Lurigancho – Chosica, Lima”. (Trabajo de Titulación) (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Callao- Colombia. 2021. pp. 123.

**PÉREZ, O.** Plan de mantenimiento preventivo para los equipos de producción, en planta de lixiviación Compañía Minera Doña Gloria SAC, Lurigancho – Chosica, Lima. (Trabajo de Titulación). (Maestría). Universidad Nacional del Callao, Perú. 2021. pp. 176.

**TORRES, K.** Electro-lixiviación de oro utilizando tiosulfato de sodio como lixivante. (Trabajo de Titulación). (Maestría). Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador. 2018. pp. 16.

**TSHILOMBO,** “Mechanism and Kinetics of Chalcopyrite Passivation and Depassivation During Ferric and Microbial Leaching,”. *The University of British Columbia.* (2004), pp. 15. ISSN 2588-0594

**ZHANG, H.; et al.** Sustainable processing of gold cyanide tailings: Reduction roasting, mechanical activation, non-cyanide leaching, and magnetic separation. *Hydrometallurgy* [en línea], 2017. [Consulta: 11 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106028>



## ANEXOS

### ANEXO A: CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO



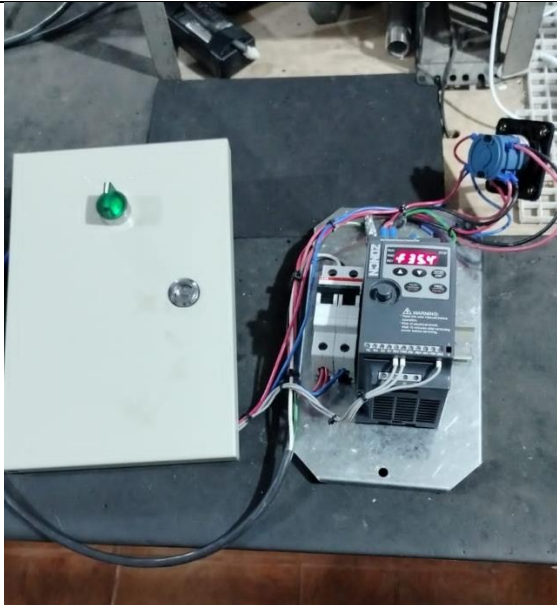
**Tanque**



**Motor**



**Agitador**




**Sistema Eléctrico**






**Tanque Agitado**

ANEXO B: ANÁLISIS DE FLUOROSCOPIA DE RAYOS X MINERAL INICIAL



**UCEM**  
UNION CEMENTERA NACIONAL  
CONSERVACIÓN DEL ENTORNO



**CEMENTO CHIMBORAZO**

**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD - UCEM S.A**  
**PLANTA CHIMBORAZO**

**INFORME DE LABORATORIO**  
**REPORTE DE ANALISIS Y ENSAYOS**

RCC-LB-008 F. GL

MUESTRA : M-1 Temp. Amb.: 25

PARA: JEFFERSON ARIAS Fecha Muestra: 7/3/2023

Fecha Reporte: 7/3/2023

Humedad: 37

ANÁLISIS QUÍMICO - XRF		MUESTRA 1	
Oxidos	Composición	M-1	
Dióxido de Silicio	SiO2	%	5.24
Oxido de Aluminio	Al2O3	%	3.05
Oxido de Hierro	Fe2O3	%	28.45
Oxido de Sodio	Na2O	%	0.18
Oxido de Calcio	CaO	%	0.32
Oxido de Magnesio	MgO	%	0.53
Oxido de Potasio	K2O	%	0.00
Oxido de Titanio	TiO2	%	0.24
Oxido de Cobre	CuO (%)	%	12.18
Oxido de Cromo	Cr2O3 (%)	%	0.01
Anhidrido Fosfórico	P2O5	%	0.00
Anhidrido Sulfúrico	SO3	%	38.60
Oxido de Niquel	NiO (%)	%	0.02
Oxido de Zinc	ZnO (%)	%	0.79
Pérdidas por calcinación (L.O.I. 950°C)		%	10.38

Observaciones:

---

REALIZADO POR :

Robinson Tocagon

Fecha: 7/3/2023 ANALISTA DE MATERIAS PRIMAS

APROBADO POR:

DARWIN NUÑEZ

Fecha: 7/3/2023 JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

Nota: no está permitido la reproducción del reporte de análisis y ensayos sin la debida autorización





epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 12 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Jefferson Gonzalo Arias Coello - Diego José Ormaza García
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1949-DBRA-UPT-2023