



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA MINERÍA

**“ETAPAS PROCESO DE AGLOMERADO Y SU  
IMPORTANCIA EN LA METALURGIA”**

Elías Fernando Anselmo Catalano Herrera.

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

**FACULTAD TECNÓLOGICA**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA MINERÍA**

# **“ETAPAS PROCESO DE AGLOMERADO Y SU IMPORTANCIA EN LA METALURGIA”**

Trabajo de Titulación Final Presentado en Conformidad a los Requisitos Para Obtener  
el Título de Técnico Universitario en Metalurgia.

Profesor Guía: Dante Ledezma García

Elías Fernando Anselmo Catalano Herrera  
Copiapó, Chile 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a mi madre Mónica por cada día motivarme y levantarme en los momentos y darme consejos muy importantes en momentos difíciles y en donde me quedaba congelado sin saber que hacer, donde quería simplemente tirar la toalla y por todo su apoyo incondicionalmente, agradecimientos también a mi padre Leonel por siempre apoyarme y levantarme los ánimos, él siempre quiso que yo no me rindiera y me daba consejos en los momentos que no sabía que hacer

Gracias a mis padres por su apoyo a seguir adelante y en especial por cada uno de sus consejos que me sirvieron mucho a lo largo de estos años, siempre estuvieron allí para mí y no los quiero defraudar.

Agradecer a mi prima Pilar y abuelita Mónica Larrondo por ayudarme y darme consejos en el proyecto de título y sus consejos me sirvieron mucho también para poder terminar esta investigación.

Gracias al profesor Dante Ledezma García por ayudarme y guiarme en todo momento a finalizar este proyecto de investigación, sin él estaría perdido sin saber que hacer, él fue mi profesor guía y agradezco que así lo fue estoy muy agradecido con él.

## RESUMEN

La presente investigación aborda las etapas del proceso de aglomeración y su importancia en la metalurgia extractiva, especialmente en el contexto de la lixiviación en pilas de minerales oxidados de Cobre y en algunos casos en sulfuros, minerales de Hierro y Oro. Este estudio se enfoca en analizar cómo la aglomeración, a través de la formación de conglomerados estables y uniformes, optimiza la permeabilidad de las pilas y mejora la eficiencia en la recuperación de metales valiosos.

Se describen detalladamente las etapas del proceso, que incluyen la preparación de la mena mineral, la dosificación de aglomerantes como bentonita, cal, polímeros, y el curado del material. Cada una de estas fases es fundamental para garantizar la estabilidad física de las pilas y un contacto efectivo entre el mineral y la solución lixivante.

El trabajo resalta cómo, el control de parámetros operativos en estas etapas, puede reducir costos, aumentar la recuperación de los metales de valor y minimizar los impactos ambientales

Como resultado, se proponen recomendaciones para optimizar las condiciones de aglomeración, priorizando la sostenibilidad y la eficiencia operativa en la industria metalúrgica. Este estudio constituye una contribución valiosa para el desarrollo de prácticas extractivas más responsables y rentables.

## ÍNDICE

### Contenido

<b>CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>2</b>
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	2
Identificar y describir etapas fundamentales de la aglomeración .....	2
Revisar los tipos de aglomerantes utilizados y su eficiencia. ....	2
Proponer buenas prácticas para optimizar las etapas del proceso. ....	2
Identificar posibles errores sobre procedimientos relacionados. ....	2
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<b>ANTECEDENTES DE LA AGLOMERACIÓN .....</b>	<b>3</b>
Primeros intentos de solución .....	3
Desarrollo de la aglomeración moderna.....	4
Impacto inicial en la industria .....	4
<b>ETAPAS DEL PROCESO DE LA AGLOMERACIÓN .....</b>	<b>6</b>
IMPACTO EN EL PROCESO:.....	7
<b>FORMACIÓN DE NÚCLEOS .....</b>	<b>7</b>
DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS CLAVES .....	7
<b>CRECIMIENTO DE PARTÍCULAS .....</b>	<b>9</b>
FACTORES CLAVES EN EL TAMBOR AGLOMERADOR.....	9
<b>APLICACIÓN DE LA AGLOMERACION EN EMPRESAS .....</b>	<b>11</b>
Preparación del Mineral. ....	11

Adición de Agentes Aglomerantes. ....	12
Control de pH: .....	14
Estabilidad del aglomerado: .....	14
Proceso de Mezclado. ....	15
Formación de Gránulos. ....	15
Apilamiento en pilas de lixiviación. ....	16
Monitoreo de la aglomeración. ....	17
<b>CAPITULO 4. ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN RESULTADOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 TABLA DE PARÁMETROS OPERATIVOS DE AGLOMERACIÓN .....</b>	<b>18</b>
Explicación de los elementos de la tabla y consecuencias posibles. ....	18
Conclusión sobre Tabla de Parámetros Operativos de Aglomeración .....	19
<b>4.2 TABLA DE LOS EFECTOS DEL AGLOMERANTE EN LA RESISTENCIA DE LOS PELLETS (Para minerales de Hierro).....</b>	<b>20</b>
Explicación de los elementos y consecuencias del mal uso: .....	20
Conclusión sobre la Tabla de Efectos del Aglomerante en la Resistencia de los Pellets .....	21
<b>RESUMEN COMPARATIVO .....</b>	<b>23</b>
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>25</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>25</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura N°1 Vista de frente de un tambor aglomerador.....	6
Figura N°2 Vista general de un tambor aglomerador por donde ocurre la formación de núcleos.....	7
Figura N°3 Imagen de análisis granulométrico de partículas.....	8
Figura N°4 Etapas de la formación de partículas mediante aglomeración y secado. ....	9
Figura N°5 Tambor donde se seca el aglomerado.....	10
Figura N°6 Vista general del tambor aglomerador dentro de una empresa. ....	11
Figura N°7 Vista general de línea de trituración de mineral de cobre. ....	12
Figura N°8 Discos de Pelletización de varios mm.....	15
Figura N°9 Gránulos de Cobre. ....	16
Figura N°10 Vista general sobre el apilamiento de la pila de lixiviación. ....	16
Figura N°11 Bentonita Sódica. ....	20
Figura N°12 Cal hidratada.....	21

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de parámetros operativos de aglomeración.....	18
Tabla 2 Efectos del aglomerante en la resistencia de los pellets. ....	20
Tabla 3 Resumen comparativo.....	23

## **CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO**

### **1.1. Introducción**

La aglomeración en la industria metalúrgica es una etapa clave para el procesamiento de las menas minerales, especialmente aquellos que involucran técnicas de lixiviación como minerales oxidados de cobre. Esta etapa consiste en la formación de partículas más grandes a partir de la mena finamente chancada, lo que permite aumentar la eficacia de la permeabilidad y la distribución del reactivo lixivante. Este trabajo tiene como objetivo describir la importancia de la aglomeración analizando sus fundamentos, métodos y posibles impactos negativos durante el proceso.

Las etapas del proceso de aglomeración son determinantes en la eficiencia global de las operaciones metalúrgicas. Comprender cómo se lleva a cabo cada etapa, desde la preparación de la mena mineral hasta la aplicación del aglomerante, es fundamental para optimizar los parámetros operativos y reducir costos. Además, estas etapas impactan la estabilidad de las pilas de lixiviación, la recuperación de metales valiosos y la sostenibilidad ambiental del proceso.

La investigación sobre las etapas de la aglomeración es vital para desarrollar estrategias que mejoren la eficiencia de los procesos extractivos. Este trabajo tiene como objetivo describir la importancia de la aglomeración analizando sus fundamentos, métodos y factores críticos que influyen en el éxito del proceso. Al abordar estos aspectos, se busca contribuir al desarrollo de prácticas metalúrgicas más eficientes, sostenibles y rentables, y dar a conocer posibles situaciones donde ocurren errores durante el proceso.

## **CAPÍTULO 2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar detalladamente las etapas de la aglomeración y su importancia en la lixiviación de minerales y dar posibles soluciones a problemas relacionados.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

Identificar y describir etapas fundamentales de la aglomeración

Revisar los tipos de aglomerantes utilizados y su eficiencia.

Proponer buenas prácticas para optimizar las etapas del proceso.

Identificar posibles errores sobre procedimientos relacionados.

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

### ANTECEDENTES DE LA AGLOMERACIÓN

En los primeros días de la metalurgia, particularmente durante la Revolución Industrial (siglo XVIII y XIX), la minería experimentó un crecimiento acelerado debido a la creciente demanda de metales para la construcción, maquinaria y transporte. Este auge trajo consigo la explotación de menas minerales de menor ley y de granulometrías más finas, resultantes de la molienda y fragmentación de materiales. Sin embargo, este tipo de partículas presentaba problemas significativos:

1. **Pérdida de material:** las partículas finas eran arrastradas por el viento o el agua, lo que disminuía la eficiencia del proceso y aumentaba las pérdidas.
2. **Compactación y manejo:** los materiales polvorientos eran difíciles de transportar y almacenar, pues se compactaban fácilmente, obstruían conductos y formaban "bloques" no permeables.
3. **Ineficiencia en procesos metalúrgicos:** en la fundición, los materiales finos se perdían en los gases de combustión, mientras que, en la lixiviación, la baja permeabilidad impedía que las soluciones químicas fluyeran adecuadamente.

#### Primeros intentos de solución

Para resolver estos problemas, los mineros y metalúrgicos comenzaron a explorar formas de unir o aglomerar las partículas finas:

- **Uso de materiales naturales:** mezclaban arcillas, agua o compuestos orgánicos para formar masas compactas que facilitaran el manejo y transporte del material.
- **Técnicas rudimentarias:** se utilizaban herramientas manuales o prensas simples para formar briquetas, precursores de los aglomerados modernos.
- **Prácticas en fundición:** en las plantas de fundición de Hierro, se observó que compactar partículas finas mejoraba la eficiencia térmica y la calidad del producto final.

## Desarrollo de la aglomeración moderna

Con el avance de la ingeniería, especialmente en el siglo XX, la aglomeración evolucionó hacia un proceso más sistemático:

- **Lixiviación en pilas:** en procesos hidrometalúrgicos, como la lixiviación de minerales oxidados de Cobre, la aglomeración comenzó a utilizarse para crear partículas más uniformes y permeables.
- **Aglomerantes artificiales:** se introdujeron compuestos como cemento, cal y polímeros para aumentar la estabilidad y resistencia de los aglomerados.
- **Maquinaria especializada:** el desarrollo de equipos como tambores rotatorios y discos peletizadoras permitió la producción de aglomerados con mayor control de tamaño y calidad.

## Impacto inicial en la industria

La implementación de la aglomeración permitió no sólo resolver problemas operativos, sino también mejorar la eficiencia/optimización de los procesos metalúrgicos. Esto fue especialmente evidente en la industria del Hierro y el Cobre, donde el manejo de partículas finas pasó de ser un obstáculo a una oportunidad para optimizar el rendimiento.

## Parámetros Clave:

- **Qué es la aglomeración:** por aglomeración se entienden los procesos en los que los materiales de granulometría fina, son transformados a partículas más grandes.
- **Propósito de la aglomeración:** el proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar para la lixiviación el material mineralizado, de manera de asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución lixivante.
- **Permeabilidad:** la permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones) finos

(granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas de lixiviación o depósitos.

- **Lixiviación:** la lixiviación es un proceso químico que utiliza solución lixivante para extraer metales valiosos de una materia prima. Se utiliza ampliamente en la minería, ya que permite obtener metales preciosos como Cobre, Oro y Plata de las rocas. Para el caso del Cobre, se utiliza ácido sulfúrico como agente lixivante y Cianuro para el Oro y la Plata.
- **Pellets:** aunque se utiliza principalmente en los minerales de Hierro, cabe aclarar que los pellets son fundamentales en la industria siderúrgica para la producción de aceros. En este caso, el mineral de Hierro triturado y molido, se aglomera en forma de pellets para ser utilizado en el proceso de sinterización o en altos hornos.
- **Resistencia mecánica de los pellets:** la resistencia mecánica de los pellets es una propiedad clave en el proceso de fabricación de productos a partir de estos pellets de minerales (como en el caso de los minerales de Hierro). Este término se refiere a la capacidad de los pellets para resistir la compresión, el impacto, la abrasión y otras fuerzas mecánicas durante su manejo, transporte, almacenamiento y uso en procesos posteriores como, por ejemplo, los de Hierro en la reducción química directa en el alto horno para producir arrabio.

## ETAPAS DEL PROCESO DE LA AGLOMERACIÓN

**Tambor aglomerador:** Esta etapa implica la homogeneización de los minerales triturados con el agente aglomerante y la cantidad adecuada de agua. Es importante distinguir entre dos tipos de procesos de aglomeración:

- **Aglomeración de minerales oxidados de cobre:** En este caso, se utiliza exclusivamente ácido sulfúrico junto con agua. El objetivo es asegurar que las partículas estén impregnadas de manera uniforme, lo que facilita el proceso de lixiviación posterior.
- **Aglomeración con cemento o polímeros:** En otros casos, se emplean cemento o polímeros como agentes aglomerantes. Durante esta etapa, se mezclan los minerales triturados con el aglomerante correspondiente y agua suficiente para lograr una distribución homogénea de las partículas.



**Figura N°1** Vista de frente de un tambor aglomerador.

## PARÁMETROS CLAVE

1. **Granulometría:** la distribución de tamaños afecta la capacidad de los finos para adherirse a las partículas más grandes.
2. **Cantidad de aglomerante:** determina la cohesión inicial; la dosificación incorrecta puede resultar en partículas mal adheridas.
3. **Contenido de agua:** influye en la adherencia y plasticidad de los materiales; demasiada agua genera lodo, mientras que poca agua dificulta la aglomeración.
4. **Tiempo de mezclado:** asegura una distribución uniforme del aglomerante.

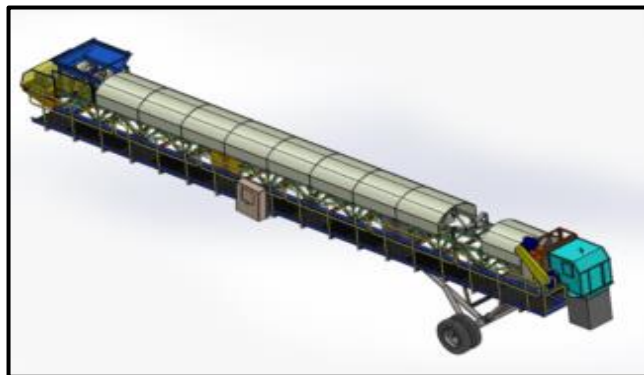
### **IMPACTO EN EL PROCESO:**

Un mezclado deficiente puede resultar en núcleos heterogéneos y partículas con baja cohesión, reduciendo la calidad y resistencia de los aglomerados, lo que afectará posteriormente el conformado de la pila de lixiviación y un eventual colapso de ella.

### **FORMACIÓN DE NÚCLEOS**

En esta etapa, las partículas más finas se adhieren alrededor de granos más grandes en el tambor aglomerador, formando los núcleos iniciales de los aglomerados. Este proceso ocurre debido a fuerzas capilares y cohesivas entre las partículas.

Para el caso de los minerales oxidados de Cobre, los parámetros clave incluyen: la velocidad de rotación del tambor, la inclinación, el tamaño, el tiempo establecido y la composición del material, así como la dosificación de ácido y agua.



**Figura N°2** Vista general de un tambor aglomerador por donde ocurre la formación de núcleos.

### **DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS CLAVES**

#### **1. Granulometría de partículas**

Es esencial que los finos sean lo suficientemente pequeños para cubrir eficazmente la superficie de las partículas grandes. Un tamaño adecuado de los finos garantiza una mejor distribución y contacto con las partículas más grandes, favoreciendo la adhesión del aglomerante. Aunque eventualmente todo se aglomerará, una granulometría adecuada desde el inicio mejora la eficiencia del proceso.



**Figura N°3** Imagen de análisis granulométrico de partículas.

## **2. Cantidad y pureza del agente lixiviante**

La cantidad y pureza del agente lixiviante influyen en la conformación y uniformidad del glómero. La cantidad de agente lixiviante suele variar entre el 1% y el 30% en relación con la mena mineral, dependiendo de sus características. Es importante aclarar que este porcentaje se refiere a la cantidad utilizada, no a su pureza, aunque ambos factores son cruciales para el éxito del proceso de lixiviación.

## **3. Humedad**

Una humedad óptima permite que las partículas se mantengan unidas

### **Posibles impactos en el proceso**

Una mala formación de núcleos genera partículas frágiles que pueden romperse en etapas posteriores, causando una mayor generación de finos secundarios, afectando posteriormente en la conformación y estabilidad de las pilas de lixiviación.

## CRECIMIENTO DE PARTÍCULAS

Los núcleos formados previamente se recubren con capas adicionales de finos y aglomerante, agrandando así su tamaño y resistencia. Esto ocurre gracias a:

### 1. Aglomeración cohesiva.

Las Partículas finas se amontonan y compactan alrededor del núcleo.

### 2. Aglomeración por capas

Se forman recubrimientos sucesivos alrededor de los núcleos.

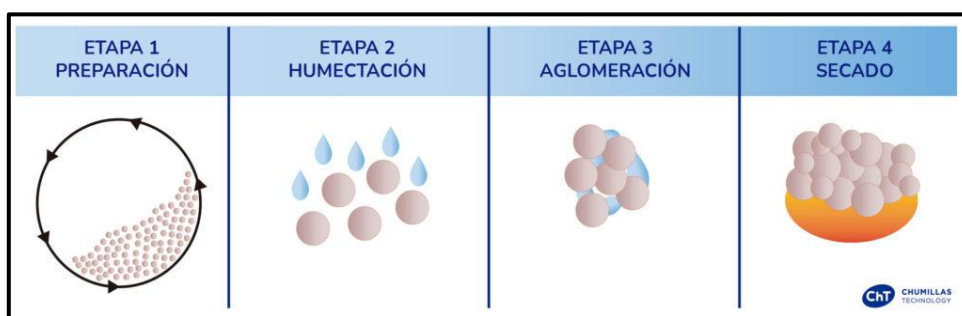


Figura N°4 Etapas de la formación de partículas mediante aglomeración y secado.

## FACTORES CLAVES EN EL TAMBOR AGLOMERADOR

### 1. Velocidad del tambor

Influye en el grado de compactación del material

### 2. Tiempo de residencia

Permite un crecimiento uniforme y suficiente consolidación de las capas.

### 3. Proporción de finos y gruesos

Una relación adecuada evita la saturación de finos, lo que puede reducir la resistencia mecánica del glómero.

## Posibles impactos en el proceso

Un crecimiento homogéneo asegura la resistencia y permeabilidad de los aglomerados en la lixiviación. Si las capas son inestables o irregulares, pueden desintegrarse durante la conformación de las pilas o el riego de éstas.

- **Secado o Endurecimiento**

Es la etapa final donde los glómeros adquieren su resistencia mecánica y estabilidad estructural. Este proceso puede ser:

- **Secado**

El agua u otros líquidos se evaporan, dejando los aglomerados más sólidos.

- **Endurecimiento por presión**

La compresión de las partículas mejora su cohesión sin reacciones químicas.



Figura N°5 Tambor donde se seca el aglomerado.

1. **Temperatura ambiental**

Afecta a la Velocidad del secado, especialmente donde el clima es húmedo o nublado

el caso del ácido sulfúrico con los minerales oxidados de Cobre.

2. **Humedad residual**

Se debe asegurar que no quede nada de humedad innecesaria, para así no arriesgar la estabilidad del aglomerado en la etapa de la formación de las pilas de lixiviación.

- **Posibles impactos en el proceso**

Un secado o endurecimiento incompleto puede comprometer la calidad del aglomerado, reduciendo su permeabilidad en las pilas y provocando el colapso de éstas en el proceso de lixiviación.

## **APLICACIÓN DE LA AGLOMERACION EN EMPRESAS**

La aglomeración en los procesos metalúrgicos es una etapa clave para mejorar la eficiencia del tratamiento de menas minerales. Este proceso varía según el tipo de mena mineral y el tipo de operación minera, pero, generalmente, en ciertas empresas se siguen ciertos pasos estructurados de la siguiente forma.



**Figura N°6** Vista general del tambor aglomerador dentro de una empresa.

### **Preparación del Mineral.**

El mineral se tritura para alcanzar tamaños que permitan la formación de glómeros. Aunque no es el objetivo, el chancado genera inevitablemente finos, lo que puede complicar la aglomeración. Para optimizar el proceso de lixiviación, se recurre a la etapa de aglomeración para mejorar la cohesión de las partículas. Es importante destacar que, en las plantas de lixiviación, no se realiza un proceso de molienda adicional.



**Figura N°7** Vista general de línea de trituración de mineral de cobre.

- **Clasificación:** en la minería del Cobre (lixiviación) no se generarían partículas demasiado grandes porque se llega hasta el chancador terciario, el que está programado para generar partículas de aproximadamente 1 /4 pulgadas. Respecto a la generación de partículas finas generadas en el chancado, no son un problema porque justamente la aglomeración aborda esa situación, es decir, aglomera las partículas finas junto al mineral que está apto en granulometría.

#### **Adición de Agentes Aglomerantes.**

**Cal:** se agrega para neutralizar el pH y proporcionar cohesión mecánica.

- Cal: La cal es ampliamente utilizada en la minería del cobre para ajustar el pH en los procesos de lixiviación. Su función principal es mejorar las condiciones del mineral para facilitar la disolución de los metales durante la lixiviación, optimizando así la recuperación del metal.
- **Solución lixivante:** se aplica una solución de ácido sulfúrico (para Cobre) o cianuro (para Oro) para preparar químicamente el mineral para la lixiviación.
- **Agua:** se agrega para ajustar la humedad dependiendo de la necesidad, favoreciendo la formación de gránulos homogéneos.

### **¿Porque se le agrega cal al aglomerado?**

- La cal (óxido de calcio, CaO) y el cemento forman enlaces químicos al reaccionar con el agua y los minerales presentes en la mezcla.
- Esto endurece los aglomerados, dándoles resistencia y que sean mucho más estables para soportar el manejo, transporte y apilamiento sin desmoronarse, ajustando el pH a niveles deseados y evitando el exceso de acidez.

### **¿En Chile es común utilizar Cal en los aglomerados?**

En Chile, es común utilizar cal en los procesos de aglomeración, específicamente en la minería del cobre. Este producto se implementa para ajustar el pH y mejorar las condiciones químicas y físicas de las partículas de los minerales tratados antes de la lixiviación. Los óxidos tratados en procesos de lixiviación suelen tener características que favorecen el uso de cal. Algunas de las razones principales para aplicar cal en la aglomeración de cobre son:

- Ajuste de pH: La cal ayuda a neutralizar la acidez en los minerales, lo que puede ser beneficioso para el proceso de lixiviación.
- Mejora de Condiciones: Al ajustar el pH, se optimizan las condiciones para la disolución del cobre, mejorando así la recuperación del metal.
- Uso en Plantas de Flotación: La cal también se utiliza en plantas de flotación, donde se aplica para ajustar el pH de la pulpa y maximizar la recuperación de minerales valiosos.

**Control de pH:**

El control de pH se refiere principalmente al proceso de lixiviación en la minería del cobre. Durante este proceso, el ambiente ácido (normalmente con un pH que puede variar entre 1.5 y 2.5, dependiendo de las condiciones específicas y del tipo de mineral) es fundamental para la disolución del cobre. Sin embargo, mantener un pH adecuado es crucial no solo para la recuperación eficiente del metal, sino también para evitar la formación de compuestos no deseados como la jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), que puede precipitarse y afectar negativamente la recuperación de cobre.

La jarosita se forma en condiciones específicas de pH y concentración de hierro, y su presencia puede obstruir el proceso de lixiviación, reduciendo la eficiencia de la extracción del cobre. Por lo tanto, el control del pH es una parte esencial del proceso para maximizar la recuperación del metal y minimizar la formación de compuestos indeseables.

**Estabilidad del aglomerado:**

La cal contribuye a mejorar la cohesión de las partículas finas y gruesas en los aglomerados, promoviendo una distribución uniforme de la solución lixiviante. Al ajustar el pH del material aglomerado, la cal ayuda a crear un entorno más adecuado para la disolución de los metales durante la lixiviación, lo que puede resultar en una mayor eficiencia en la recuperación del mineral.

Empresas que utilizan Polímeros como Agente Aglomerante:

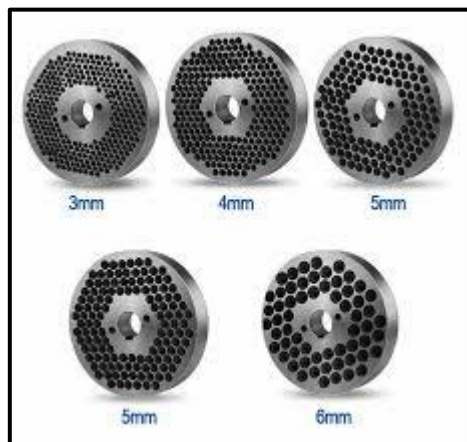
- Minera Los Pelambres: Esta empresa ha explorado el uso de polímeros en sus procesos de aglomeración para mejorar la estabilidad de los gránulos.
- Antofagasta Minerals: En algunos de sus proyectos, se ha investigado la utilización de polímeros para mejorar la cohesión y el rendimiento de los aglomerados en procesos de lixiviación.

### **Neutralización de acidez (En sulfuros de cobre u oxidados):**

Algunos minerales, específicamente los sulfuros de cobre, como la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y covelina ( $\text{CuS}$ ), liberan ácido durante su reacción con el oxígeno o los agentes lixiviantes. Esta oxidación puede resultar en la generación de ácido sulfúrico, lo que provoca un aumento de la acidez en el proceso. La cal (óxido de calcio) actúa como un neutralizante eficaz para contrarrestar esa acidez.

### **Proceso de Mezclado.**

**Equipos de aglomeración:** Se utilizan tambores aglomeradores o discos pelletizadores para mezclar la mena mineral con agentes aglomerantes (cemento o cal). Este proceso es común en la minería del hierro y también se aplica a otros minerales.



**Figura N°8** Discos de Pelletización de varios mm.

### **Formación de Gránulos.**

- En esta etapa, las partículas individuales se unen en gránulos con tamaños uniformes.
- **Tamaño ideal:** Suele oscilar entre 5 y 15 mm para facilitar la percolación uniforme de las soluciones lixiviantes.



**Figura N°9** Gránulos de Cobre.

**Apilamiento en pilas de lixiviación.**

- Los gránulos se apilan en pilas diseñadas para permitir el flujo de soluciones lixiviantes.
- Se controla la compactación para evitar la formación de canales preferenciales que comprometan la eficiencia del proceso.



**Figura N°10** Vista general sobre el apilamiento de la pila de lixiviación.

**Monitoreo de la aglomeración.**

- Durante todo el proceso se monitorea constantemente el pH, humedad y estabilidad de los gránulos y la percolación de la solución lixiviante

**Factor clave**

- **Optimiza la disolución del cobre:** Un pH ácido (1.5-2.5) maximiza la solubilidad del cobre en soluciones de ácido sulfúrico.
- **Previene compuestos indeseados:** Evita la formación de jarosita y la disolución excesiva de impurezas como hierro y aluminio.
- **Minimiza costos:** Reduce el consumo innecesario de ácido sulfúrico y mejora la eficiencia del proceso.
- **Protege equipos e infraestructura:** Evita la corrosión excesiva en condiciones de pH extremas.
- **Asegura el control ambiental:** Previene problemas como el drenaje ácido de minas, cumpliendo regulaciones ambientales.

## CAPITULO 4. ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN RESULTADOS

### 4.1 TABLA DE PARÁMETROS OPERATIVOS DE AGLOMERACIÓN

Parámetros	Valor óptimo	Breve descripción
Granulometría Inicial	< 2 mm	Tamaño adecuado para asegurar la formación de aglomerados estables.
Humedad	8-12%	Proporciona cohesión inicial entre las partículas.
Cantidad de aglomerante	3-10 kg/tonelada de mineral	Asegura la estabilidad química y física de los aglomerados.
Tiempo del mezclado	5-10 minutos	Garantiza la homogeneidad en la distribución del aglomerante y el agua.
pH del lixiviante	1.5-2.0	Ideal para curado ácido en minerales oxidados de Cobre.

**Tabla 1** Tabla de parámetros operativos de aglomeración.

#### Explicación de los elementos de la tabla y consecuencias posibles.

##### 1. Granulometría inicial

- Define el tamaño de las partículas del mineral antes de la aglomeración. Si son demasiado finas pueden provocar compactación excesiva u otros problemas relacionados, afectando a la permeabilidad y viabilidad del aglomerado.

##### 2. Humedad

- La humedad proporciona cohesión entre las partículas para formar los aglomerados. Si la humedad es baja, no se formarán los aglomerados y si es alta serán inestables.
- **Efecto de una mala humedad:** al lixiviar con una humedad inadecuada puede causar que el aglomerado no sea compacto y colapse.

### 3. Cantidad del aglomerante

- Se entiende a la cantidad de Cal añadido para unir las partículas.
- **Ejemplo de mala administración de aglomerante:** si hay poca cantidad de aglomerante los glómeros pueden ser muy frágiles y si hay mucha cantidad, elevará los costos innecesariamente.

### 4. Tiempo del mezclado

- El tiempo del mezclado asegura que las partículas se unan uniformemente para formar el aglomerado con el agua.
- **Ejemplo de mal tiempo del mezclado:** un mezclado incorrecto o insuficiente puede producir aglomerados heterogéneos, afectando su calidad.

### **Conclusión sobre Tabla de Parámetros Operativos de Aglomeración**

Esta tabla refleja cómo los parámetros como la granulometría, la humedad, la dosis de aglomerante, el tiempo de mezclado y el pH del lixiviante, son esenciales para lograr aglomerados homogéneos, estables y rentables. El control preciso de estos valores garantizará:

- Una adecuada cohesión entre partículas.
- La formación de aglomerados con suficiente porosidad para permitir el correcto y eficiente flujo y percolación del lixiviante.
- La optimización del proceso de lixiviación, maximizando la recuperación de metales valiosos.

No obstante, cualquier desviación significativa de los valores óptimos puede comprometer la eficiencia del proceso. Por ejemplo, una granulometría inadecuada o un pH fuera de rango puede llevar a cabo muchas pérdidas considerables en la recuperación de metales.

#### 4.2 TABLA DE LOS EFECTOS DEL AGLOMERANTE EN LA RESISTENCIA DE LOS PELLETS (Para minerales de Hierro)

Aglomerante	Resistencia Mecánica (kg/pellet)	Observaciones
Bentonita	6-8	Buena Cohesión especialmente en pelletización de Hierro.
Cal Hidratada	5-7	Económico, y mejora la estabilización química.
Polímeros	8-9	Una alternativa consistente y efectiva.

Tabla 2 Efectos del aglomerante en la resistencia de los pellets.

#### Explicación de los elementos y consecuencias del mal uso:

##### 1. Bentonita (sódica):

- Muy utilizada en la pelletización de minerales de Hierro porque mejora la cohesión, sin afectar las propiedades metalúrgicas del pellet. Adecuada para pellets que se someterán a altas temperaturas en hornos.
- Si hay demasiada Bentonita, los aglomerados tienden a ser muy plásticos y deformables, lo que puede afectar su resistencia mecánica.



Figura N°11 Bentonita Sódica.

## 2. Cal Hidratada [Ca (OH)<sub>2</sub>]

- Económica y accesible, estabiliza químicamente los aglomerados y reduce la acidez excesiva. Aplicada en minas donde el costo es un factor crítico.
- Una cantidad excesiva de cal puede neutralizar en exceso la acidez del lixivante, afectando negativamente la química de la lixiviación.



Figura N°12 Cal hidratada.

## 3. Polímeros:

- Materiales modernos que buscan reducir el impacto ambiental, logrando una buena resistencia sin el uso de cemento o arcillas. Propuestos en proyectos sostenibles para minimizar residuos.
- Se utilizan en la aglomeración de minerales como el oro, la plata y el cobre.
- Un exceso de polímeros puede producir aglomerados extremadamente duros y rígidos, lo que dificulta su manejo y lixiviación.

### **Conclusión sobre la Tabla de Efectos del Aglomerante en la Resistencia de los Pellets**

La selección del tipo y cantidad de aglomerante es un factor crítico y fundamental, que influye en la resistencia mecánica y estabilidad química de los aglomerados. Cada aglomerante tiene ventajas específicas según el tipo de mineral y el proceso:

- **Bentonita:** es ideal para procesos de pelletización, pero en exceso puede generar compactación no deseada. Recomendable para la pelletización de Hierro, ya que la Bentonita actúa como aglomerante principal para mejorar la resistencia mecánica en pellets sometidos a tratamientos térmicos, por ejemplo, en altos hornos.
- **Cal Hidratada:** Es económica y eficaz para estabilizar aglomerados, pero un exceso puede elevar el pH, afectando la lixiviación. Se recomienda su uso para minerales que tienden a generar ácido durante el proceso de lixiviación, como los sulfuros, ya que neutraliza el exceso de ácido del lixivante y estabiliza el pH, previniendo reacciones adversas o no deseadas.
- **Polímeros:** alternativas modernas y sostenibles, aunque su costo debe ser evaluado para proyectos a gran escala. Recomendado generalmente en procesos que buscan mayor sostenibilidad, ya que los polímeros son biodegradables y son normalmente recomendados en proyectos de lixiviación de minerales con certificaciones ambientales estrictas.

El análisis sugiere que la cantidad de aglomerante debe ajustarse con base en pruebas específicas del mineral, buscando siempre el equilibrio entre resistencia mecánica, permeabilidad y costos operativos.

## RESUMEN COMPARATIVO

<b>Aglomerante</b>	<b>Ventaja Principal</b>	<b>Uso Principal</b>	<b>Precaución Principal si se utiliza en exceso</b>
<b>Bentonita</b>	Mejora la cohesión y plasticidad	Pelletización y en minerales arcillosos	Compactación y baja permeabilidad
<b>Cal</b>	Estabilidad del pH	Minerales reactivos o con alto contenido ácido	Elevación excesiva del pH
<b>Polímeros</b>	Sostenibilidad	Minerales difíciles de aglomerar	Costo elevado

**Tabla 3** Resumen comparativo.

Las tablas proporcionadas en esta investigación subrayan que la aglomeración no es un proceso genérico, sino que debe adaptarse cuidadosamente a las características específicas del mineral y a los objetivos del proceso metalúrgico. El considerar los parámetros y uso materiales en proporciones óptimas, no sólo maximiza la recuperación de metales, sino que también garantiza la sostenibilidad económica y operativa del proyecto.

Estos hallazgos resaltan la importancia de la investigación previa y la implementación de controles estrictos durante la operación, para evitar pérdidas a largo o corto plazo, proporcionando un marco de referencia valioso para la mejora continua en procesos industriales de aglomeración.

## **CAPITULO 5. CONCLUSIÓN**

A lo largo de este estudio, se ha analizado el proceso de aglomeración, su influencia en la metalurgia extractiva, y los factores críticos que afectan su eficiencia. En particular, se ha puesto énfasis en los parámetros operativos, los tipos de aglomerantes y los posibles impactos negativos derivados de su uso excesivo. Este análisis ha permitido entender la importancia de la optimización en la aglomeración para maximizar la recuperación de metales y reducir los costos operativos. Sin embargo, los resultados también han resaltado la necesidad de un control preciso y de estudios previos para asegurar que cada parámetro se mantenga dentro de los límites óptimos.

La aglomeración es un proceso fundamental en la metalurgia, especialmente en la lixiviación y Pelletización de los minerales, donde su eficiencia tiene un impacto directo en la recuperación de metales y la reducción de costos operativos. A lo largo de este trabajo, se ha demostrado que el control adecuado de parámetros operativos como la granulometría, la humedad, el tiempo de mezclado y la dosis de aglomerante, es esencial para garantizar la calidad de los aglomerados y, por consiguiente, la eficiencia del proceso. Sin embargo, el uso excesivo de aglomerantes, como Bentonita o Cal, puede resultar en una serie de problemas, entre los cuales destacan la reducción de la permeabilidad, el aumento innecesario de costos y la disminución de la recuperación de los metales de valor.

Para optimizar el proceso, es crucial realizar pruebas previas meticulosamente y ajustar los parámetros según las características del mineral, con el fin de mantener un equilibrio adecuado entre la calidad de los aglomerados y la viabilidad económica del proyecto. En este sentido, la investigación y el control constante de las variables operativas son indispensables para lograr un proceso de aglomeración eficiente y rentable, que también respete los estándares tanto como ambientales y operativos.

Este estudio ha proporcionado un marco general que puede ser aplicado tanto en la investigación como en la práctica profesional, y sienta las bases para futuras investigaciones sobre el uso de aglomerantes alternativos y técnicas de optimización en la aglomeración.

## **CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA**

### **Bibliografía**

- Angel Azañero Ortiz\*, P. N. (2000). CÓMO MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE ORO EN LIXIVIACIÓN. Lima: Instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia. Obtenido de [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v03\\_n5/extracc\\_lixiv.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v03_n5/extracc_lixiv.htm)
- Escalona, L. M. (2007). Aglomerado y curado en el . MentSolver. .: mentsolver. Obtenido de <https://www.metsolver.com/Papers/dt3.pdf>
- EUROPEA, C. C. (2004). Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Expo, c/ Inca Garcilaso s/n, E-41092 Sevilla – Spain: Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos.
- Lhoist. (2024). Aglomeración de mineral de hierro. Santiago: Lhoist. Obtenido de <https://www.lhoist.com/es-ES/mercado/acero/aplicacion/aglomeración-de-mineral-de-hierro>
- Nikhil Dhawan, S. S. (31 de Mayo de 2012). Aglomeración de mineral triturado y su control para operaciones de lixiviación en pilas. Universidad de Utah. Salt lake : Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/614726776/Agglomeration-control-fos-heap-leaching-en-es>
- RUDYARD WALTER TORRES DE LA CRUZ, J. J. (2010). DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS. Lima: Universidad nacional de ingeniería. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/8f06/252bbc45f0eb5aa437cef8e1510780ce4cdd.pdf>
- Urbano Ricardo Cruz Condori, J. R. (2023). Influencia de pH en el proceso de cementación de cobre a partir de PLS de óxidos. Miami: South Florida Journal of Development.
- Vicente, A. (2019-2021). Curado y aglomeración: Pretratamiento en la lixiviación. Santiago: Universidad de Santiago.

Wikipedia. (2023). Lixiviación (Metalurgia). Francisco, California: Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Lixiviación\\_\(metalurgia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Lixiviación_(metalurgia))

Wikipedia. (2024). Metalurgia. San Francisco, California: Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Metalurgia>

Wikipedia. (2024). Procesamiento de minerales. San Petersburgo, Florida: Wikipedia. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Procesamiento\\_de\\_minerales](https://es.wikipedia.org/wiki/Procesamiento_de_minerales)

wikipedia, C. d. (2024). Metalurgia Extractiva. San Francisco, California: Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Metalurgia\\_extractiva](https://es.wikipedia.org/wiki/Metalurgia_extractiva)