



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

## **USO DE AGLOMERANTES EN LA LIXIVIACIÓN DE RIPIOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERA CIVIL DE MINAS**

**NATACHA ANDREA MIÑO CORTÉS**

**PROFESOR GUÍA**

Dra. Lilian de Lourdes Velásquez Yévenes

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

Mg. Francisco J. Rivas Saldana

Mg. Carlos A. Moraga Cruz

**CURICÓ - CHILE**

2021

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## RESUMEN

Lixiviar ripios de cobre se ha convertido en un gran desafío para la industria minera, ya que algunos de estos cuentan con leyes atractivas que podrían resultar en grandes beneficios económicos, el problema de la lixiviación está relacionada a la presencia de finos que hace muy dificultoso el proceso de percolación debido a que la solución lixivante circula por la pila junto con los finos creando masas impenetrables, las cuales serán lixiviadas nula o pobremente. La solución más factible para este problema se basa en el uso de aglomerantes, los cuales, disminuyen la cantidad de finos mediante la unión entre estos o a la unión de finos y partículas de mayor tamaño. Hoy en día se conocen un sinnúmero de aglomerantes, pero no todos son los indicados para cada tipo de ripio, es por lo anterior que se realizará un estudio que evaluará distintos aglomerantes.

El presente estudio muestra una exhaustiva investigación bibliográfica que reúne los diferentes aglomerantes y técnicas de aglomeración que, sin duda son de gran ayuda para llevar a cabo la lixiviación de ripios que cada vez es más necesaria en nuestro país. Debido a las medidas de confinamiento producto de la pandemia la parte experimental de esta memoria no pudo ser realizada en los laboratorios de la Universidad de Talca. La memoria entonces se finalizó de la siguiente manera, mediante el estudio bibliográfico se eligieron cinco investigaciones, tres de estas utilizaron aglomerantes, estos son estuco, poliacrilamida y metacaolín, uno no utilizó aglomerantes y el último utilizó otro ripio para aglomerar. Se analizaron los resultados que presentaron tanto en la permeabilidad como en la recuperación de cobre y el que obtuvo mejores resultados fue la poliacrilamida “No iónica 4”, llegando a una recuperación aproximada del 91%, pero esto a nivel de laboratorio, en cuanto a la gran industria se escogió al metacaolín como mejor aglomerante por su bajo costo en relación con la poliacrilamida y con una recuperación de cobre del 56%.

Palabras claves: Lixiviación de ripios, aglomerantes, permeabilidad, recuperación de cobre.

## ABSTRACT

Leaching copper rubble has become a great challenge for the mining industry, since some of these have attractive grades that could result in great economic benefits, the leaching problem is related to the presence of fines that makes it very difficult to process because when the leaching solution circulates through the heap, the fines also do so by creating impenetrable masses, which will be leached null or poorly, that is why the most feasible solution is the use of binders, which decrease the amount of fines through the union between these or the union of fines and larger particles. Nowadays there are several binders known but not all of them are indicated for the rubble that they have; it is for this reason that a study will be carried out that will evaluate different binders.

This study shows an exhaustive bibliographic research that brings together the different binders and agglomeration techniques that, without a doubt, are of great help to carry out the leaching of rubble that is increasingly necessary in our country. Due to the confinement measures resulting from the pandemic, the experimental part of this study could not be carried out in the laboratories of the University of Talca. The investigation was then finalized as follows, by means of the bibliographic study, five investigations were chosen, three of these used binders, these are stucco, polyacrylamide and metakaolin, one did not use binders and the last one used another rubble to bind. The results that presented both in the permeability and in the recovery of copper were analyzed and the one that obtained the best results was the polyacrylamide "Non-ionic 4", reaching an approximate recovery of 91%, but this at the laboratory level, in terms of the large industry chose metakaolin as the best binder due to its low cost in relation to polyacrylamide and with a recovery of 56%.

Keywords: Leaching, binders, permeability, copper recoveries.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi mamá, por ser mi compañera eterna en cada paso que doy, por su apoyo incondicional, porque todo lo que algún día logre en la vida te lo debo a ti, espero llegar a ser tan grande como tú y que mis hijos me vean de la misma manera que te veo yo.

A mi papá, la persona más esforzada que existe, que trabajó incansablemente para que mi hermano, mi mamá y yo tuviéramos todo lo que deseáramos, espero que estés muy orgulloso de mí.

A mi hermano Oscar, por siempre motivarme, ser el mejor hermano que se puede pedir y darme la alegría de ser tía de Mateo.

A mi Jesús, por todos estos años juntos, espero que nuestros sueños se cumplan, te amo.

A la Dra. Lilian Velásquez, por darme la oportunidad de realizar la memoria con usted, no conocí a otra profesora en la universidad tan preocupada por sus estudiantes, no ha sido fácil desarrollar esta memoria en pandemia, pero su ayuda y comprensión han sido fundamentales, espero algún día conocernos en persona, muchas gracias.

Y también al Centro Tecnológico de Conversión de Energía de la Universidad de Talca por el apoyo prestado durante el desarrollo de mi memoria.

*“Para Malva”*

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes y Motivación .....	1
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Solución del problema.....	2
1.4. Objetivos .....	2
1.4.1. Objetivo general .....	2
1.4.2. Objetivos específicos .....	2
1.5. Alcances.....	3
1.6. Metodologías y Herramientas utilizadas .....	3
2. DESARROLLO DEL TEMA .....	4
2.1. Marco Teórico .....	4
2.2. Metodología .....	20
Equipos .....	20
Materiales .....	24
Procedimiento .....	26
2.3. Resultados y Análisis .....	36
2.4. Discusiones .....	56
3. CONCLUSIONES.....	59
4. REFERENCIAS.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Esquema de un circuito típico de lixiviación en pilas de sulfuro de cobre (Petersen, 2015). .....	4
Figura 2. 2 Comparación de la percolación de la solución en mineral aglomerado frente a mineral no aglomerado (Dhawan et al., 2012). .....	5
Figura 2. 3 Pequeñas cantidades de aglomerante mantienen unidos a los aglomerados permitiendo que tanto las soluciones como los gases se filtren a través del mineral (Eisele et al., 2004).....	6
Figura 2. 4 Características importantes en la aglomeración de estuco de partículas finas de mineral en la superficie de una partícula de mineral gruesa, (A) estado inicial de partículas de mineral y reactivos, (B) mezcla de partículas de mineral, solución ácida y estuco con formación de puente líquido, (C) aglomerado metaestable, y (D) estructura de aglomerado estable final formada por la hidratación de las partículas de aglomerante de estuco (Dhawan et al., 2012).....	6
Figura 2. 5 Tambor aglomerador industrial (Bouffard, 2015). .....	10
Figura 2. 6 Aglomeración en cintas (Kawatra & Lewandowsky, 2009a). .....	10
Figura 2. 7 Aglomeración de disco (Kawatra & Lewandowsky, 2009a) .....	11
Figura 2. 8 Valores de k en cm/seg. (Angelone et al., 2006) (Elaboración propia). .....	14
Figura 2. 9 Tipos de aglomerados (Kodali et al., 2011). .....	15
Figura 2. 10 Mecanismos de unión física y química típica asistidas por aglomerantes químicos (Wang, 2020). .....	17
Figura 2. 11 Fuerzas de Van der Waals (Creación propia).....	18
Figura 2. 12 Un ejemplo de enlace de hidrógeno entre dos moléculas de agua (Kawatra & Lewandowsky, 2009b). .....	19
Figura 2. 13 Tamizadora Ro-Tap RX 29-10 (Fuente: Amazon, 2020).....	21
Figura 2. 14 Tambor aglomerador (Kodali et al., 2011). .....	21
Figura 2. 15 Multímetro (Fuente: Amazon, 2020).....	22
Figura 2. 16 Permeámetro (Fuente: Gruposait, 2020). .....	22
Figura 2. 17 Separador de rifles y poruña (Peña, 2019). .....	23
Figura 2. 18 Imagen referencial de criba vibratoria (Directindustry, 2021).....	24
Figura 2. 19 Columnas de acrílico utilizadas en los ensayos (Peña, 2019). .....	25



Figura 2. 20 Soporte de madera y columna de PVC (Peña, 2019).....	25
Figura 2. 21 Distribución del tamaño de partícula del alimento para experimentos de aglomeración (Kodali, 2010).....	29
Figura 2. 22 Esquema de la prueba de Permeabilidad (Kodali, 2010).....	30
Figura 2. 23 Columnas cargadas con los aglomerados (Kodali, 2010).....	31
Figura 2. 24 Estrategia de mezclado.....	32
Figura 2. 25 Procedimiento experimental de prueba de remojo (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).	34
Figura 2. 26 Resultados de distribución de tamaño de partículas de los aglomerados (Kodali et al., 2011). .....	37
Figura 2. 27 Efecto del contenido de agua sobre el tamaño de los aglomerados (Kodali et al., 2011). .....	38
Figura 2. 28 Resultados de la prueba de permeabilidad (Kodali et al., 2011).....	38
Figura 2. 29 Concentraciones de cobre en PLS en función del tiempo para la lixiviación en columnas de aglomerados sin aglomerantes y aglomerados de estuco (Kodali et al., 2011). .....	39
Figura 2. 30 Comparación de recuperaciones de cobre de lixiviación en columnas de aglomerados (Kodali et al, 2011).....	40
Figura 2. 31 Resultado prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019). .....	41
Figura 2. 32 Resultado prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019). .....	42
Figura 2. 33 Gráfico de dispersión extracción de cobre total versus permeabilidad (Peña, 2019). .....	44
Figura 2. 34 Análisis granulométrico.....	45
Figura 2. 35 Resultados de la prueba de remojo utilizando una gama de productos con carga iónica variable, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).....	47
Figura 2. 36 Resultados de prueba de remojo, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).....	48
Figura 2. 37 Resultados de la prueba de remojo utilizando una gama de productos de poliacrilamida con carga variable, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).....	48
Figura 2. 38 Ejemplo de ubicaciones de donantes de enlaces de hidrógeno en una cadena de poliacrilamida (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).....	49
Figura 2. 39 Ejemplo de la falta de ubicaciones donantes de enlaces de hidrógeno en una cadena de acetato de polivinilo (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).....	50

Figura 2. 40 Efecto del tiempo de curado sobre la migración de finos utilizando varios agentes químicos (Eisele et al., 2010).....	51
Figura 2. 41 Conductividad hidráulica para los aglomerantes de mejor rendimiento (Eisele et al., 2010) .....	52
Figura 2. 42 Recuperaciones de cobre de columnas de lixiviación a largo plazo (Eisele et al., 2010).	53
Figura 2. 43 Distribución de tamaño de aglomerados a base de mineral de cobre de baja ley con varios contenidos de metacaolín (Chen et al., 2020).....	54
Figura 2. 44 Migración de finos para aglomerados a base de mineral de cobre de baja ley en diversos contenidos de metacaolín (Chen et al., 2020).....	54
Figura 2. 45 Tasas de permeabilidad de alimento, aglomerados y lecho mineral de grano grueso durante la lixiviación en columnas (Chen et al., 2020).....	55
Figura 2. 46 Extracciones de cobre de alimento, aglomerados y lecho mineral de grano grueso durante la lixiviación en columnas (Chen et al., 2020).....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Mineralogía de la muestra de alimento del mineral de cobre utilizado para los experimentos de aglomeración (Kodali et al., 2011) (Elaboración propia).....	29
Tabla 2. 2 Distribución del tamaño del mineral de cobre utilizado en experimentos (Kawatra & Lewandowsky, 2009b) (Elaboración propia).....	33
Tabla 2. 3 Resultados mineralógicos de una muestra de mineral de cobre ((Kawatra & Lewandowsky, 2009b)(Elaboración propia).....	33
Tabla 2. 4. Composición química del cobre (Chen et al., 2020).....	35
Tabla 2. 5 Condiciones de preparación de aglomerados a base de mineral de cobre (Chen et al., 2020). .....	36
Tabla 2. 6. Tiempo en función de la altura de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	40
Tabla 2. 7 Parámetros prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	41
Tabla 2. 8 Tiempo en función de la altura de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	42
Tabla 2. 9 Parámetros de prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	42
Tabla 2. 10 Valores de k y R de la muestra M-1 en medio saturado y no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	43
Tabla 2. 11 Valores de k y K de la muestra M-1 en medio saturado y no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).....	43
Tabla 2. 12 Leyes de RCC y RSC en los sondajes.....	45
Tabla 2. 13 Leyes para la pila 70/30.....	45
Tabla 2. 14 Conductividad Hidráulica.....	45
Tabla 2. 15 Tasa de curado y recuperación de cobre.....	46

# 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años las leyes de cobre han disminuido paulatinamente (Wang *et al.*, 2020), es por esto, que la industria minera ha comenzado la búsqueda de nuevos métodos para obtener metales y así generar mayores ganancias, una de las alternativas se basa en poder lixiviar los ripios de las faenas, ya que poseen altas leyes y además son atractivos económicamente porque estos ripios se ahorran el proceso de chancado primario (Kawatra & Lewandowsky, 2009a), el problema radica en que los ripios tienen muy alto porcentaje de finos, lo que perjudica enormemente la estabilidad y permeabilidad de las pilas en el proceso de lixiviación, es por lo anterior, que se hace imperativo efectuar el proceso de aglomeración, ya que de esta manera aumentará la resistencia de los aglomerados y se reducirá la migración de finos mejorando la permeabilidad de la pila (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

El proceso de aglomeración busca la adhesión de las partículas más finas a las superficies de las más gruesas o también la unión entre partículas finas mediante el uso de aglomerantes, refino (solución lixivante) o también a través del uso de otros minerales, para así, evitar posibles obstrucciones de material en las pilas y que esto impida el paso del ácido a través de esta, generando que algunas secciones queden sin lixiviar o solo se lixivien parcialmente y que finalmente reduzca la recuperación de cobre. Además, el aglomerante debe ser capaz de resistir a un ambiente extremadamente ácido, (Kawatra & Lewandowsky, 2009b) lo que hace aún más difícil la búsqueda. Posterior a la aglomeración se continúa con el tiempo de reposo del aglomerado o también llamado curado y por último con la etapa final que es la lixiviación.

El presente estudio tiene como objetivo el empleo de aglomerantes para la aglomeración de ripios que se desean lixiviar en pilas. En un inicio, el estudio contemplaba la realización de experiencias de laboratorio, pero debido a las condiciones de confinamiento producto de la pandemia estas no han sido posible de ser llevadas a cabo. Para continuar con este análisis entonces se realizó una investigación bibliográfica mucho más profunda junto con la recopilación de datos reales de planta de un ripio aglomerado con un material inerte, además de pruebas de permeabilidad realizadas por otros estudios con diferentes aglomerantes. Toda esa información sirvió para generar los resultados que se presentarán en la presente tesis.

## 1.1. Antecedentes y Motivación

Esta memoria plantea la importancia de realizar un eficaz uso de los aglomerantes en ripios de cobre con alto contenido de finos, para así poder lixiviarlos. Los ripios de cobre poseen leyes algunas veces superiores a las que actualmente se trabajan en la minería y además de esto, los procesos de conminución como el chancado no son necesarios, ya que anteriormente se realizaron, entonces los costos energéticos del chancado y molienda ya no son parte de la ecuación, esto a diferencia de los minerales que actualmente se encuentran en estos procesos y que además sus leyes cada día disminuyen, por lo que el correcto uso de los aglomerantes traería consigo altos beneficios económicos.

## **1.2. Descripción del problema**

La gran cantidad de finos presentes en los ripios de cobre hacen imposible la lixiviación, ya que al momento de añadir la solución de ácido estos migran creando sólidos impenetrables, los cuales no permiten la correcta percolación de la solución produciéndose inestabilidad dentro de la pila, dificultando el proceso.

## **1.3. Solución del problema**

El uso de aglomerantes para unir los finos entre sí o también para unir partículas de mayor tamaño con finos es la mejor solución al problema, ya que de esta manera la pila contaría con una mejor permeabilidad y también reduciría la probabilidad de derrumbes, permitiendo así poder lixiviar la pila para obtener beneficios económicos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Estudiar y evaluar diferentes tipos de aglomerantes, para la aglomeración de ripios de cobre, para su posterior lixiviación.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica de los distintos tipos de aglomerantes utilizados en la minería del cobre.
- Buscar diferentes técnicas de caracterización en bibliografías y escoger cuáles son los mejores para realizar pruebas en los aglomerados.

- Definir si el aglomerante elegido como mejor según los testeos realizados es el indicado, esto a través de los ensayos de lixiviación encontrados en bibliografía.

## **1.5. Alcances**

En primera instancia la presente memoria se centra en el estudio bibliográfico de los aglomerantes y, en segundo lugar, en realizar el proceso de aglomeración a nivel de laboratorio. Debido a las condiciones de confinamiento por la pandemia estos ensayos no pudieron ser llevados a cabo, es por esto, que se utilizaron estudios ya existentes de aglomerantes para compararlos y de esta forma poder elegir el mejor.

## **1.6. Metodologías y Herramientas utilizadas**

Las metodologías que se utilizarán para esta investigación es la siguiente:

1. Se analizarán cinco estudios diferentes, cuatro de ellos utilizarán aglomerantes con muestra en blanco. Estos cinco estudios se escogerán dentro de los recopilados después de una revisión bibliográfica.
2. Se describirán los procesos que cada uno de estos estudios realizó para conseguir resultados en pruebas de permeabilidad y remojo.
3. Por último, se comparará los resultados de recuperación de cobre obtenidos en la lixiviación y se definirá cuál es el que obtuvo un mayor porcentaje de recuperación.

## 2. DESARROLLO DEL TEMA

### 2.1. Marco Teórico

#### 1. Lixiviación en pilas

Si bien la mayor parte del cobre del mundo se produce mediante pirometalurgia más tradicional, aproximadamente el 20% se produce mediante hidrometalurgia. La lixiviación en pilas (Figura 2.1) es el método principal para la extracción hidrometalúrgica de cobre. La lixiviación en pilas permite la extracción de cobre de los minerales sin necesidad de moler hasta los vertederos; sin embargo, los métodos de lixiviación actuales implican la construcción de pilas diseñadas para optimizar la extracción. Durante la lixiviación en pilas, el mineral se apila mediante el uso de cinta transportadora, también se practica el vaciado de camiones, pero generalmente resulta en una compactación indeseable de la superficie de la pila por parte de los camiones (Petersen, 2015), luego este se deposita sobre una plataforma protectora donde se riega con una solución de lixiviación (Hill, 2013). La solución percola a través de la pila y disuelve los minerales que contienen cobre. La solución que fluye también puede causar la migración de partículas finas dentro del lecho de mineral. La migración de finos obstruye los canales de flujo natural y forma capas impermeables dentro de la pila que el refino (solución lixivante) no puede penetrar fácilmente. Cuando esto sucede, la solución fluye alrededor de las secciones de la pila, dejándolas sin lixiviar o solo parcialmente, lo que reduce la recuperación general (Kawatra & Lewandowsky, 2009b). La solución de lixiviación enriquecida (PLS) que contiene cobre se recolecta mediante extracción por solvente, después el cobre se transfiere desde el PLS a una solución de electrolito para su posterior electrodeposición a cátodos con una pureza de un 99,99 % en cobre.

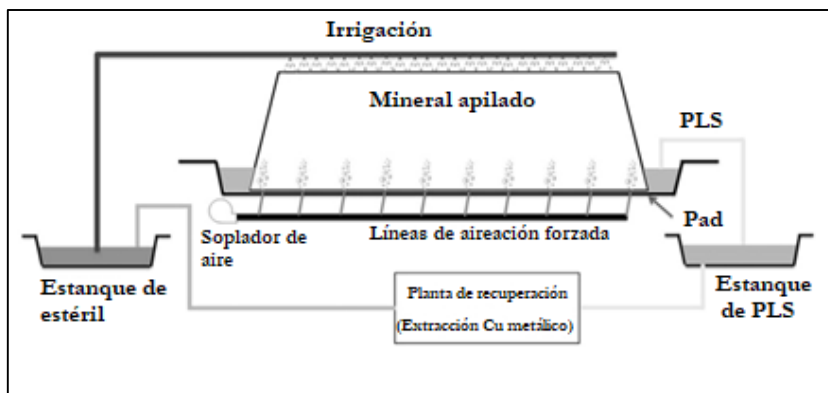


Figura 2. 1 Esquema de un circuito típico de lixiviación en pilas de sulfuro de cobre (Petersen, 2015).

## 2. Aglomeración

Hace que las partículas más pequeñas se adhieran a las superficies de las partículas de mineral más gruesas, lo que evita que los finos migren. Sin embargo, la práctica actual consiste en aglomerar el mineral humedeciéndolo con refino, este procedimiento no une las partículas con mucha fuerza, lo que da como resultado la descomposición del aglomerado, lo que provoca la migración de finos como se muestra en la Figura 2.2. Una aglomeración inadecuada puede causar problemas hidrológicos, segregación y canalización, pero no hay garantía de que la aglomeración resolverá estos problemas únicamente porque, además de la aglomeración, la manipulación mecánica de aglomerados durante el transporte y el apilamiento afecta significativamente las características de la pila (Dhawan *et al.*, 2012).

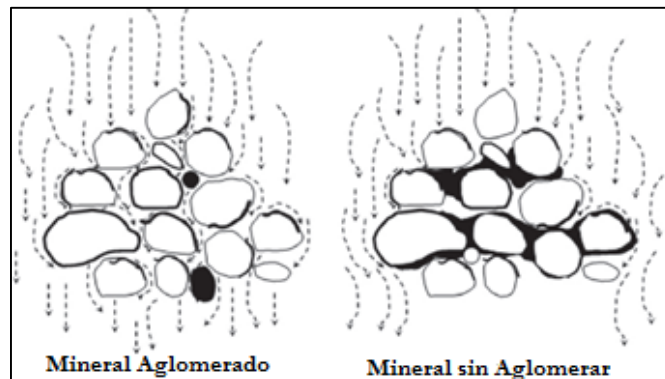


Figura 2. 2 Comparación de la percolación de la solución en mineral aglomerado frente a mineral no aglomerado (Dhawan *et al.*, 2012).

## 3. Aglomerantes

Para que no ocurra el problema del desarme de glómeros por manipulación de estos y las partículas de mineral se adhieran con mayor fuerza entre ellas, se utiliza aglomerantes. Un aglomerante puede ser un líquido o un sólido que forma un puente, una película o una matriz (Figura 2.3), o que también provoca una reacción química. La proporción de finos y arcillas en el mineral determina la necesidad y la dosis de aglomerante. El pH de la operación de lixiviación en pilas determina la naturaleza del aglomerante seleccionado. Muy pocas operaciones de lixiviación en pilas de cobre agregan aglomerante a la combinación de ácido sulfúrico / agua, posiblemente debido a la selección limitada de aglomerantes tolerantes a los ácidos y resistentes a los microbios (polímeros y yeso) (Bouffard, 2005). Un aglomerante eficaz no solo debe tener una fuerte afinidad por las superficies de las partículas, sino que



también debe resistir el entorno ácido extremo que se encuentra en la pila (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

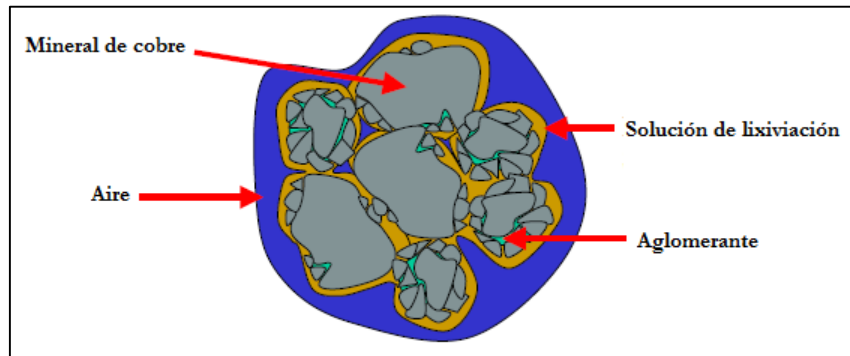


Figura 2. 3 Pequeñas cantidades de aglomerante mantienen unidos a los aglomerados permitiendo que tanto las soluciones como los gases se filtren a través del mineral (Eisele *et al.*, 2004)

A continuación, se presentan y describen los diferentes tipos de aglomerantes que se utilizarán en este estudio.

### I. Estuco

También conocido como sulfato de calcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ), se utiliza en forma de polvo fino y se añade en el tambor aglomerador (Kodali *et al.*, 2011). La acción del estuco sólido como aglomerante durante el proceso de aglomeración se muestra en la Figura 2.4. Se indicó que los aglomerados a base de estuco tienen más estabilidad, mayor tamaño con menos liberación de finos y una mejor permeabilidad del lecho aglomerado (Dhawan *et al.*, 2012).

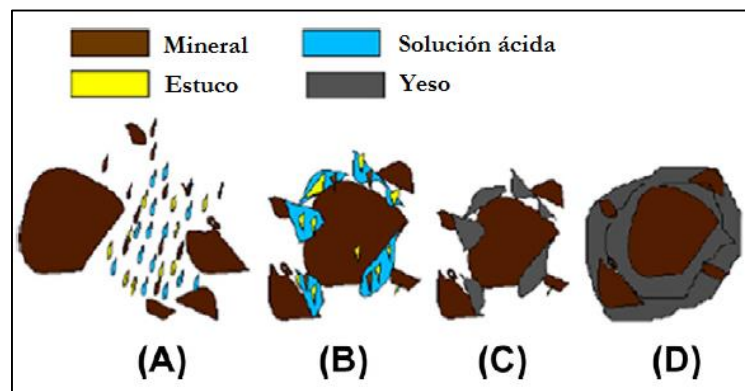


Figura 2. 4 Características importantes en la aglomeración de estuco de partículas finas de mineral en la superficie de una partícula de mineral gruesa, (A) estado inicial de partículas de mineral y reactivos, (B) mezcla de partículas de mineral, solución ácida y estuco con formación de puente líquido, (C) aglomerado metaestable, y (D) estructura de aglomerado estable final formada por la hidratación de las partículas de aglomerante de estuco (Dhawan *et al.*, 2012).

## **II. Poliacrilamida**

Existen varios tipos, por ejemplo, aniónicos, catiónicos y no aniónicos (Kawatra & Lewandowsky, 2009b). La poliacrilamida es uno de los polímeros más comunes utilizados como floculante, además es el aglomerante más eficaz para el mineral de calcosina de baja ley debido a la presencia de atracción electrostática, enlaces de hidrógeno y enlaces físicos, siendo el más importante los enlaces de hidrógeno (Dhawan *et al.*, 2012). Las poliacrilamidas tienen algunos de los pesos moleculares más altos entre los productos químicos industriales sintetizados, también es importante tener en cuenta que algunas poliacrilamidas son más tóxicas que otras. (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

## **III. Proceso de geopolimerización**

Es un proceso de activación alcalina de aluminosilicatos como metacaolín, cenizas y escoria. Se propuso por primera vez en la década de 1980 y se desarrolló significativamente en las décadas posteriores. Las materias primas utilizadas en este proceso se han ampliado para incluir compuestos ricos en minerales de silicio y aluminio, como relaves de minas y desechos de cenizas voladoras (Chen *et al.*, 2020).

## **IV. Aditivo 1**

Se utiliza para aglomerar minerales arcillosos de cobre, es de bajo costo, resistente a soluciones ácidas y forma gránulos porosos con buena resistencia mecánica. Debido a su naturaleza pegajosa, la melaza parece un aglomerante atractivo, que actúa como pegamento para aglomerar partículas. Las fuerzas de adhesión son relativamente débiles. Es más, bajo riego, estas fuerzas se debilitan debido a la disolución de la melaza. Sin embargo, si se combina con cal hidratada, se produce una reacción exotérmica entre la sacarosa y la cal que forma sucrato de calcio, un material rígido y estable que se adhiere firmemente a las partículas. Debido a que la reacción es rápida, los reactivos deben mezclarse inmediatamente antes de la aglomeración (Bouffard, 2005).

## **V. Cal**

Se recomienda la aglomeración de cal para minerales que no contienen arcillas, ya sea en bandas para partículas gruesas o en bandas con tolvas vibratorias para partículas menores de 12 mm ( $\frac{1}{2}$ "'). Se sabe desde hace mucho tiempo que la cal fortalece las arcillas a través de tres mecanismos: (1) formación de carbonatos, (2) desestructuración de los minerales arcillosos elevando el pH, y (3) por intercambio iónico, en cuyos cationes monovalentes naturales adsorbidos sobre los minerales arcillosos son intercambiados por cationes divalentes. El último mecanismo reduce el espesor de la doble capa difusa, minimizando así el hinchamiento de la arcilla (Bouffard, 2005).

## **VI. Puzolana**

Es un material silíceo o alumino-silíceo fino. Cuando se mezcla con cal y agua a temperatura ambiente, las partículas finas y vítreas producen compuestos cementosos como gel de silicato de calcio hidratado y aluminosilicato de calcio. La puzolana fragua lentamente en comparación con el cemento (Bouffard, 2015).

## **VII. Extract-Ore®**

Es un copolímero de látex de peso molecular medio con carga aniónica moderada. El polímero consta de micro geles hinchados con agua, de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  de diámetro. Cuando se diluyen en agua, los micro geles se solubilizan instantáneamente, exponiendo los grupos funcionales a lo largo del esqueleto polimérico a los sitios cargados de las partículas de mineral (Bouffard, 2015).

## **VIII. Cemento Portland**

El cemento Portland tipo II se usa comúnmente en la lixiviación en pilas de oro y plata y también es el tipo de cemento más común que se usa en la industria de la construcción. El cemento Portland Tipo I también se puede usar para otros minerales, este cemento

generalmente se usa para operaciones que no entrarán en contacto con suelos o aguas subterráneas (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

#### **4. Curado**

El mineral aglomerado generalmente se apila y se deja curar o reposar durante un período de horas a varias semanas dependiendo del tipo de mena. Para la aglomeración con cemento, se han informado tiempos de curado de 8 a 96 horas (Bouffard, 2005). El período de curado permite que se formen fuertes enlaces entre las partículas gruesas y las arcillas finas. Sin embargo, dependiendo del tipo de mineral, el tiempo de curado puede variar desde tiempos tan cortos como 8-24 horas (Bouffard, 2015) o hasta de 1 a 5 días o más dependiendo de la mena.

#### **5. Equipos de aglomeración**

Hay varios métodos utilizados para lograr la aglomeración en la industria de la lixiviación en pilas, entre ellos destacan tres tipos: aglomeración en tambor, aglomeración en cintas y aglomeración de disco. Se debe considerar también que algunas plantas como Radomiro Tomic y Zaldívar no utilizan estos tipos para aglomerar sus minerales, sino que lo realizan en las correas transportadoras a medida que el material es conducido a la pila.

- Aglomeración en tambor: El proceso consiste en inyectar mineral en un tambor cilíndrico inclinado que gira para impartir balanceo, cascada y volteo, este se muestra en la Figura 2.5. Las partículas se ponen en movimiento por el equilibrio entre las fuerzas gravitacionales y centrífugas. Los tambores comerciales tienen un promedio de 6,4 metros (21 pies) de longitud y 2,1 metros (6,8 pies) de diámetro. El tambor rara vez superará los 15 metros (50 pies) de longitud. Otro tambor se instala en paralelo para manejar un mayor rendimiento. La solución se bombea a través de boquillas o tubos perforados ubicados preferentemente a lo largo de los primeros 2/3 de la longitud del tambor. El tambor puede tener un revestimiento de goma para evitar la corrosión y estar equipado con cadenas sueltas o tiras de goma para evitar que el mineral se pegue (Bouffard, 2005).

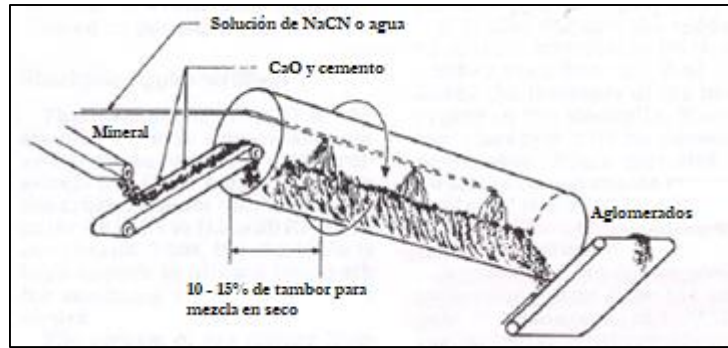


Figura 2. 5 Tambor aglomerador industrial (Bouffard, 2015).

- Aglomeración en cintas: Es uno de los métodos más comunes debido al bajo costo (Figura 2.6). Este tipo de aglomeración es mejor cuando hay muy poco material fino. Los transportadores suelen funcionar entre 76 y 91 m / min y suelen tener un ángulo de unos  $15^\circ$ . El material se mezcla a través de múltiples puntos de transferencia. Las barras de dispersión de metal se suspenden en la corriente de mineral que cae para ayudar en la mezcla en cada punto de transferencia. Se necesitan aproximadamente 1,8 m de velocidad vertical entre los puntos de transferencia para permitir las aspersiones y las barras de dispersión. Este espacio permite que el mineral se mezcle. El número de puntos de transferencia depende de la cantidad de finos en el material. El material se puede rociar con agua mientras se descarga en una cinta transportadora en los puntos de transferencia a lo largo de la cinta. En general, los aglomerados tienen un tiempo de residencia de aproximadamente 10 a 15 segundos (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

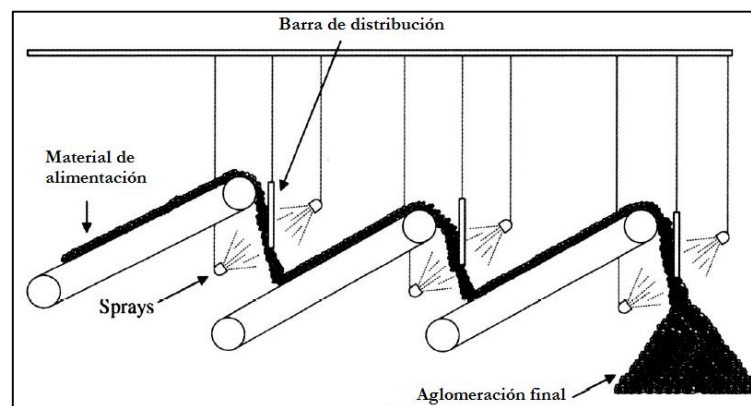


Figura 2. 6 Aglomeración en cintas (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

- Aglomeración de disco: Este tipo de método de aglomeración rara vez se utiliza para operaciones de lixiviación en pilas, salvo en el laboratorio. El método de aglomeración en

disco es beneficioso cuando se trabaja con material fino y, por lo general, puede producir un tamaño de aglomerado uniforme con una resistencia superior. Algunos de los parámetros operativos más importantes incluyen el ángulo (Figura 2.7), la velocidad del disco, el punto de alimentación del material, la ubicación y la cantidad de agua pulverizada (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

La pendiente del disco suele estar entre 40 ° y 65 ° desde la horizontal. Las rotaciones por minuto (rpm) del disco pueden oscilar entre 30 y 50, dependiendo del diámetro y la pendiente del disco (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

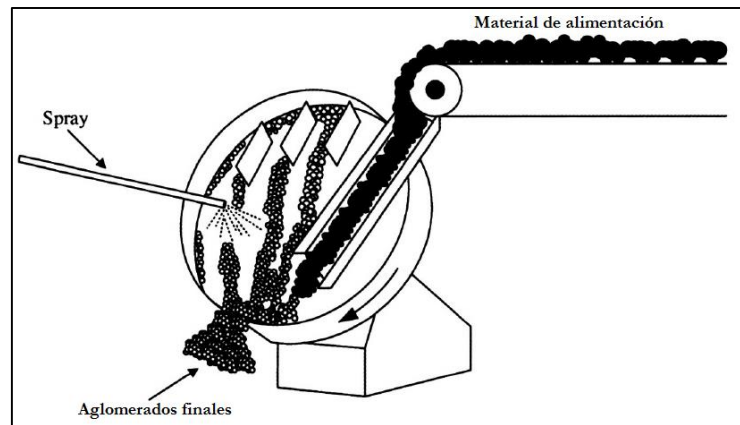


Figura 2. 7 Aglomeración de disco (Kawatra & Lewandowsky, 2009a)

## 6. Técnicas de caracterización

### a) Permeabilidad

El principal problema que ocasionan las partículas muy finas es la impermeabilización del lecho del mineral en la pila, lo que genera un impedimento en el flujo de la solución. El flujo de la solución a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Darcy en 1856, quien investigó las características del flujo de agua a través de filtros de material térreo (Angelone *et al.*, 2006), esta ley está representada por la ecuación (1):

$$\frac{Q}{A} = \frac{(K\Delta P)}{\mu L} \quad \text{Ley de Darcy} \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal ( $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ )

A: Área de columna ( $\text{cm}^2$ )

K: Permeabilidad ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta P$ : Diferencia de Presión

$\mu$ : Viscosidad del agua

L: Longitud de la columna ocupada por los aglomerados (cm)

Utilizando determinados dispositivos de diseño, Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas el gasto o caudal Q es como se muestra en la ecuación (2),

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = k \times i \times A \quad (2)$$

Donde:

Q: Caudal ( $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ )

$\partial V$ : Variación del volumen en un diferencial de tiempo

$\partial t$ : Diferencial de tiempo

$k$ : Coeficiente de permeabilidad ( $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ )

$i$ : Gradiente hidráulico

A: Sección transversal del filtro ( $\text{cm}^2$ )

Los estudios de Darcy también utilizan un valor de velocidad  $v$ , dicha velocidad es la velocidad de descarga que se define como la cantidad de agua que circula en la unidad de tiempo a través de una superficie unitaria perpendicular a las líneas de filtración (Angelone *et al.*, 2006).

En arenas firmes saturadas y en otros suelos de granos finos, también saturados, donde la circulación del agua no afecta la estructura del material, la velocidad  $v$  puede ser determinada casi exactamente por la ecuación (3),

$$v = i_p \times \frac{K}{\eta} \quad [\text{cm/seg}] \quad (3)$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad del agua, en  $KN \frac{seg}{cm^2}$

K: Constante de permeabilidad ( $cm^2$ )

$i_p$ : Gradiente de presiones, en  $KN/cm^3$

La viscosidad del agua disminuye con la temperatura, K es constante para un material permeable dado, con porosidad dada y además es independiente de las propiedades físicas del líquido que se filtra por el material (Angelone *et al.*, 2006). Si se reemplaza el valor de  $i_p$  por su equivalente  $i \times \gamma_w$  ( $\gamma_w$ : peso específico del agua en  $KN/m^3$ ) se tiene la ecuación (4),

$$v = i \times \gamma_w \times \frac{K}{\eta} \quad [cm/seg] \quad (4)$$

La mayoría de los problemas que enfrenta la Ingeniería Civil, tratan filtraciones de agua a poca profundidad, con muy poca variación de la temperatura del líquido, de modo que  $\gamma_w$  es prácticamente constante. Como, dentro de ese rango de temperaturas  $\eta$  varía entre límites poco extensos, es costumbre expresar la ecuación anterior como la ecuación (5),

$$v = k \times i$$

Donde

$$k = \gamma_w \times \frac{K}{\eta} \quad [cm/seg] \quad (5)$$

k es el coeficiente de permeabilidad, que se expresa como una función de la constante de permeabilidad del material, la viscosidad y el peso específico del fluido circulante.

Planteado así, el valor de k, expresado en cm/seg, puede ser considerado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario (Angelone *et al.*, 2006). La Figura 2.8 expresa los valores del coeficiente de permeabilidad y formas de determinarlo.



	100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
<b>Drenaje</b>	<b>Bueno</b>						<b>Pobre</b>		<b>Prácticamente impermeable</b>			
<b>Tipo de suelo</b>	Grava Limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava.			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada.				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.			
		Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición.										
<b>Determinación directa de k</b>	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
<b>Determinación indirecta de k</b>	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.				

Figura 2. 8 Valores de k en cm/seg. (Angelone *et al.*, 2006) (Elaboración propia).

### b) Distribución de tamaño de aglomerado

Se estudia el tamaño de los aglomerados a través de una distribución granulométrica, para esto se utiliza un tamizador Ro-Tap, en él se depositan las muestras aglomeradas secas y se agitan a una velocidad baja, luego de esto se procede a pesar el material que quedó retenido en cada uno de los tamices, para así determinar cuál su granulometría.

### c) Inspección visual

La "prueba del guante" es ampliamente utilizada por los operadores de plantas hidrometalúrgicas y está limitada a la experiencia del operador. Esto implica la inspección visual de una muestra por parte de un operador, pero es subjetivo, manual y proporciona una

indicación muy limitada (Velarde, 2005). La idea es sacar una porción del material aglomerado con un guante que luego se deja caer, si el material no queda pegado en el guante entonces la aglomeración es adecuada. Se realiza para tener una idea aproximada de la calidad del aglomerado como se muestra en la Figura 2.9.

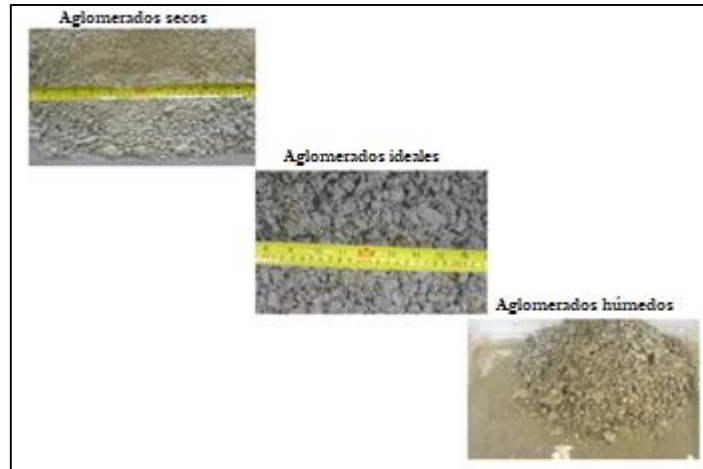


Figura 2. 9 Tipos de aglomerados (Kodali *et al.*, 2011).

#### **d) Ensayos de conductividad hidráulica**

El uso de la conductividad eléctrica se basa en el cambio drástico que tiene lugar después de que la humedad agregada (conductora) ha alcanzado el límite de absorción y comienza a formarse una película alrededor de las partículas. Esta película conduce a la formación de aglomerados a través de puentes líquidos, que al mismo tiempo forman conexiones eléctricas. Los valores de conductividad eléctrica forman una curva exponencial. Antes de la formación de la película (durante la absorción), los aumentos de humedad casi no dan lugar a aumentos de la conductividad eléctrica. El mayor cambio en la curva indica la presencia de una película de humedad. Se utiliza como parámetro de guía para ajustar la humedad óptima para condiciones de aglomeración (Velarde, 2005).

#### **e) Prueba de remojo**

Se desarrolla para dar una idea de qué tan bien se mantendrán los aglomerados con el refino (solución de lixiviación) y el aglomerante elegido, y luego de esto se someten a condiciones ácidas que se pueden encontrar en una pila. Se pretende medir la tendencia de los aglomerados

a liberar partículas finas en suspensión, lo que conduce a la migración de los finos y, finalmente, a la obstrucción de los canales a través de la pila de lixiviación. La principal ventaja de la prueba de remojo es que es muy rápida y sencilla de realizar (Eisele *et al.*, 2010). El porcentaje de migración de finos se calcula utilizando la ecuación (6):

$$\text{Migración de finos} = \frac{\text{Peso de mineral que migró fuera de la muestra}}{\text{Peso total de finos presentes en la malla}} \quad (6)$$

#### f) Prueba de percolación de columna inundada

Se utiliza principalmente para determinar la resistencia de los aglomerados a lo largo del tiempo (Dhawan *et al.*, 2012). Y también para medir la migración de finos, los cambios en la densidad aparente y la conductividad hidráulica.

### 7. Mecanismos de unión por aglomeración

Los mecanismos de unión de la aglomeración se dividen en las siguientes cinco categorías: puentes sólidos, fuerzas de adhesión y cohesión, tensión superficial y presión capilar, fuerzas de atracción entre sólidos y enlaces entrelazados. Aunque estos mecanismos se han clasificado en categorías, es poco probable que en los aglomerados se produzca un solo mecanismo.

- Puentes sólidos: Los puentes sólidos se pueden formar mediante sinterización, fusión parcial, reacciones químicas, endurecimiento de aglomerantes, recristalización y durante el secado (Figura 2.10a). La sinterización, la fusión parcial y la recristalización a menudo forman puentes sólidos debido a un cambio de temperatura del sistema. A medida que aumenta la temperatura, se produce la fusión. Los puentes se forman a medida que el material se enfría. Los puentes sólidos formados por reacciones químicas o endurecimiento de aglomerantes a menudo se crean con la adición de humedad. La temperatura y la presión elevadas pueden aumentar la resistencia de estos puentes (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).
- Adhesión y cohesión: Las fuerzas de adhesión y cohesión se producen en las interfaces sólido-líquido cuando se emplean aglomerantes muy viscosos, como miel, brea y alquitrán. Estas fuerzas (Figura 2.10b) también conducen a la atracción de átomos o moléculas libres de la

atmósfera circundante a la superficie de los sólidos, formando capas de adsorción, que luego pueden penetrar las capas de adsorción de otras partículas (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

- **Tensión superficial y fuerzas capilares:** La tensión superficial y las fuerzas capilares son factores clave en la aglomeración húmeda como se muestra en la Figura 2.10c. Los aglomerados están unidos por puentes líquidos que se forman a partir de agua libre o condensación capilar. La presión capilar se crea cuando todo el volumen de poros entre las partículas se llena de líquido, lo que hace que se formen meniscos en los extremos de los poros. Esto conduce a una presión capilar negativa que le da al aglomerado una fuerza adicional. Sin embargo, la unión por tensión superficial sola a menudo no proporciona fuerzas suficientemente fuertes para soportar las condiciones de manipulación después de que el material ha sido aglomerado (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).
- **Las fuerzas de atracción entre partículas sólidas:** Las fuerzas de atracción entre partículas sólidas son principalmente fuerzas moleculares, eléctricas y magnéticas (Figura 2.10d). A distancias pequeñas, el efecto de estas fuerzas puede ser grande, aunque disminuyen rápidamente con la distancia. Estas fuerzas también pueden aumentar las fuerzas debidas a otros mecanismos de unión (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).
- **Enlaces entrelazados:** cuando las partículas se enredan durante la aglomeración, se producen enlaces entrelazados (Figura 2.10e). Este mecanismo también puede ocurrir si las partículas se compactan (Kawatra & Lewandowsky, 2009a).

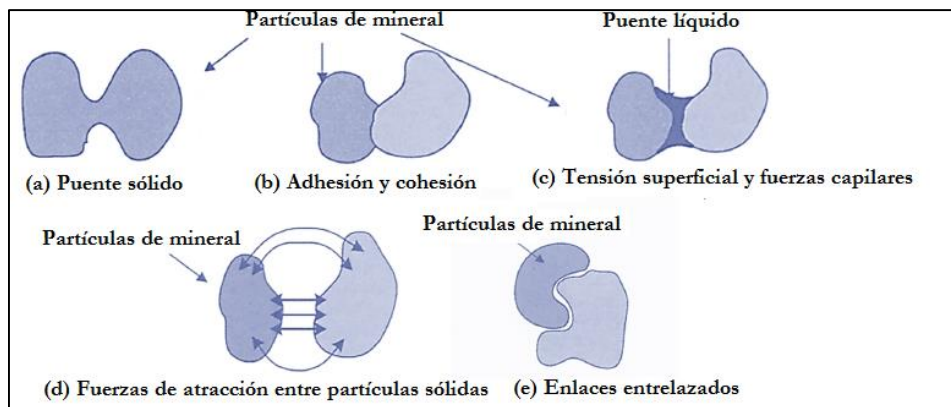


Figura 2. 10 Mecanismos de unión física y química típica asistidas por aglomerantes químicos (Wang, 2020).

## 8. Fuerzas de atracción

Las fuerzas de atracción pueden actuar entre las partículas de mineral y un aglomerante, dando fuerza al aglomerado. Las fuerzas de atracción entre partículas sólidas son principalmente moleculares, electrostáticas y magnéticas. A distancias pequeñas, el efecto de estas fuerzas puede ser grande, aunque disminuyen rápidamente con la distancia (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

#### a. Fuerzas de van der Waals

Las fuerzas de van der Waals son fuerzas físicas de atracción y repulsión que existen entre moléculas y que se producen debido a la polarización inducida en cada partícula por la presencia de otras, esto se ve reflejado en la Figura 2.11. El secado induce interacciones de van der Waals, lo que hace que las cadenas de polímero se adsorban irreversiblemente al mineral (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

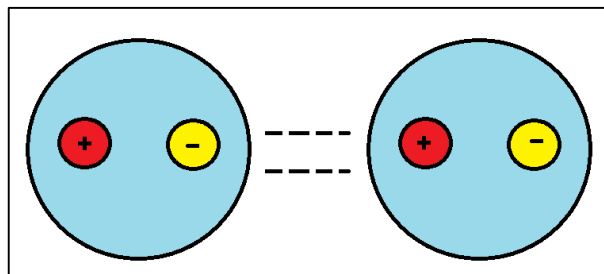


Figura 2. 11 Fuerzas de Van der Waals (Creación propia)

#### b. Fuerzas de valencia

Surgen cuando los enlaces entre átomos o moléculas se rompen, creando nuevas superficies con valencias insatisfechas. Si el área de superficie recién creada es grande, las valencias mismas pueden recombinarse si las superficies recién creadas se acercan entre sí.

#### c. Asociación sin valencia

Esta incluye enlaces de hidrógeno. El enlace de hidrógeno es una interacción de atracción entre un átomo electronegativo y un átomo de hidrógeno (donante de enlace de hidrógeno) que está unido a otro átomo electronegativo (receptor de enlace de hidrógeno). El receptor de enlace de hidrógeno no necesita estar unido a un átomo de hidrógeno. El átomo

electronegativo es casi siempre flúor, oxígeno o nitrógeno, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 2.12. Los enlaces de hidrógeno son típicamente más fuertes que las fuerzas de van der Waals, pero son más débiles que los enlaces covalentes o iónicos. Las fuerzas de los enlaces de hidrógeno varían dependiendo de los átomos donadores y receptores de enlaces. Si un aglomerante tiene sitios donantes de enlaces de hidrógeno, aumentará la capacidad de que se produzcan enlaces de hidrógeno entre el mineral y el polímero, lo que le dará resistencia adicional al aglomerado. Si un aglomerante no tiene sitios donantes, no puede tener lugar el enlace de hidrógeno, dejando los aglomerados con menor resistencia que aquellos con aglomerantes que tienen sitios donantes.

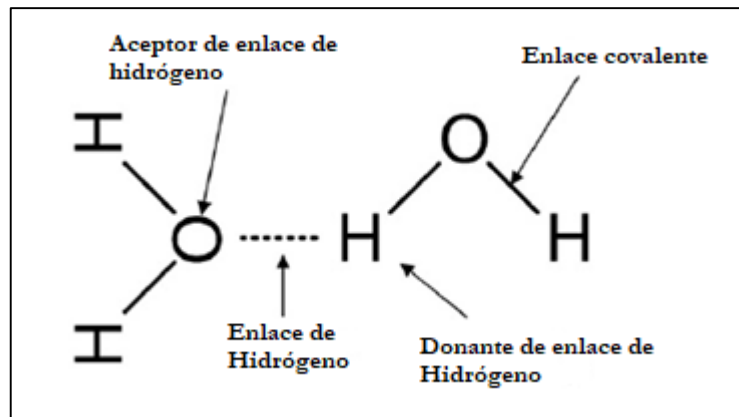


Figura 2. 12 Un ejemplo de enlace de hidrógeno entre dos moléculas de agua (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

#### d. Fuerzas electrostáticas

Existen debido a campos electrostáticos insatisfechos. Cuando las superficies se sumergen en agua, el intercambio de iones con el líquido hace que se formen capas dobles eléctricas. Es probable que los aglomerantes catiónicos se ionicen más fuertemente cuando se someten a un ácido. Esto les permite ser atraídos por las superficies de mineral cargadas negativamente, neutralizando las cargas superficiales de las partículas de mineral. Cuando los polímeros aniónicos se someten a un ácido, sus cargas se neutralizan, dejándolos incapaces de unirse al mineral por atracción electrostática (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

#### e. Fuerzas magnéticas

Actúan de manera similar a las fuerzas electrostáticas. Esta fuerza atracción se limita a partículas que poseen estas propiedades.

## 2.2. Metodología

El trabajo experimental contará con dos opciones de realización, esto por el motivo de que para llevar a cabo el estudio (primera opción) que inicialmente se quería realizar, es necesario utilizar los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Talca, los cuales, por motivo de la pandemia se encuentran cerrados hasta nuevo aviso, es por lo anterior que si estos no se pueden emplear se procederá con la segunda opción. De todas formas, se presenta la primera opción porque se dedicó tiempo a establecerla como parte de esta memoria.

*La primera opción* consistirá en evaluar distintos aglomerantes para un determinado ripio de cobre, esto se realizará mediante la ejecución de distintas técnicas de caracterización en cada uno de los aglomerados y como finalidad de esta investigación se determinará que aglomerante cumplió mejor en todas las pruebas realizadas.

*La segunda opción* se basará en analizar cinco estudios, el primer estudio utilizó como aglomerante el estuco, este estudio se llamará Investigación 1, el segundo no ocupó aglomerantes y se nombrará Investigación 2 y así sucesivamente, la Investigación 3 utilizó otro ripio como aglomerante, la Investigación 4 utilizó distintas poliacrilamidas y por último la Investigación 5, la cual se realizó con metacaulín como aglomerante. Cada una de estas investigaciones cuenta con una prueba de permeabilidad y posterior recuperación de cobre y se comparará cual obtuvo los mejores resultados, cabe destacar que las muestras utilizadas en cada estudio tienen diferentes características, por lo que, no será posible comparar los resultados de permeabilidad, pero sí se podrá analizar si el uso de los aglomerantes fue factible o no.

### Equipos

#### *Opción 1:*

- Tamizadora Ro-Tap RX-29-10: Es una tamizadora que produce movimientos circulares y de golpeo mediante una acción mecánica uniforme, garantizando así ensayos fiables y comparables, esta se muestra en la Figura 2.13, en el caso de este estudio se utilizará para

cuantificar la cantidad de finos presentes en los aglomerados para posteriormente realizar una curva granulométrica.

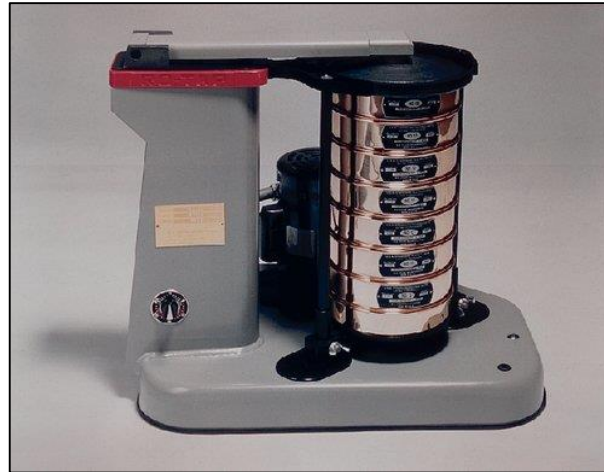


Figura 2. 13 Tamizadora Ro-Tap RX 29-10 (Fuente: Amazon, 2020)

- Tambor aglomerador de laboratorio: En él se introducen los rípios y los aglomerantes para formar los aglomerados, el tiempo de estadía de estos en el tambor dependerá de las características de los rípios, también este debe tener un ángulo de inclinación, además cabe señalar que el tambor que se utilizará en este estudio es de tamaño pequeño, como se muestra en la Figura 2.14, porque su uso es solo para realizar ensayos en laboratorios con poca cantidad de muestra, a diferencia de los industriales que son de gran tamaño.



Figura 2. 14 Tambor aglomerador (Kodali *et al.*, 2011).

- Multímetro: Es un instrumento eléctrico portátil que mide magnitudes eléctricas, como corrientes, potenciales, resistencias, capacidades y otras. En el caso específico de este



estudio se utilizará para medir la resistencia para los ensayos de conductividad eléctrica, este se muestra en la Figura 2.15.



Figura 2. 15 Multímetro (Fuente: Amazon, 2020).

- Permeámetro: Se utilizará para medir la permeabilidad de los aglomerados ante el paso de los fluidos a través de ellos. En la Figura 2.16. se muestra una imagen representativa del Permeámetro.



Figura 2. 16 Permeámetro (Fuente: Gruposait, 2020).

*Opción 2:*

Investigación 1:

- Tambor aglomerador con una velocidad de rotación fija de 20 rpm y con 5° de inclinación, como el que se muestra en la Figura 2.14.
- ICP: Es un instrumento que determina elementos de la tabla periódica en una determinada muestra.
- Agitador Ro-Tap

#### Investigación 2:

- Balanza de precisión: Para masar el mineral.
- Separador de rifles y poruña: Para dividir las muestras de utilizó el separador de rifles Soiltest y la poruña se usó para verter el material en él como se ve en la Figura 2.17.



Figura 2. 17 Separador de rifles y poruña (Peña, 2019).

- Medidor de pH: Se utilizó para medir el pH se la solución lixivante.
- Cronómetro

#### Investigación 4:

- Divisor rotatorio: Se utiliza para separar las muestras.
- Balanza
- Tambor giratorio
- Difractómetro de rayos X

#### Investigación 5:

- Rodillos de molienda de alta presión (GM35-16, CITIC Heavy Industries, China)
- Criba vibratoria: Esta se utiliza para separar mineral por tamaño, la Figura 2.18. muestra una criba referencial.



Figura 2. 18 Imagen referencial de criba vibratoria (Directindustry, 2021)

- XRF, EDX-7000/8000: Este se utiliza para la fluorescencia de rayos X.
- Tambor cilíndrico de polietileno (11,2 cm de diámetro y 13,3 cm de longitud)

## **Materiales**

### *Opción 1:*

Los materiales que se utilizarán son los siguientes:

- Rípios de faenas mineras.
- Ácido sulfúrico: Se utiliza para la prueba de lixiviación, ya que gracias a este se puede extraer el cobre de la roca.
- Aglomerantes: En el caso de este estudio se utilizarán los siguientes: poliacrilamida, estuco, cal, aditivo 1, Extract-Ore®, Puzolana y cemento Portland.
- Plástico: Se utilizará para realizar el cuarteo.
- Guantes: Los cuales se utilizarán en la prueba del guante.

### *Opción 2:*

#### Investigación 1:

- Muestra de mineral de cobre extraída de las operaciones de lixiviación en pilas de Zaldívar en Chile con una ley promedio de 1,21% de cobre y un 10% de finos pasantes de malla 200.
- Estuco en forma de polvo

- Ácido sulfúrico
- Columna cilíndrica de aproximadamente cuatro pulgadas de diámetro y siete pulgadas de largo.
- Columnas de lixiviación de 4 pulgadas de diámetro y 6 pies de altura.

Investigación 2:

- Material: En este caso el material que se utilizó es mineral oxidado de cobre separado en 72 muestras de 500 gramos, con una granulometría donde el 90% del material presenta un diámetro menor a 1,68 mm (Malla #10 Tyler).
- Columna de acrílico: Estas se utilizaron como permeámetro, estas tenían un diámetro de 4,1 centímetros y una altura de 38 a 41 cm, se le atornilló un fondo falso de 2 cm de altura y se le agregó una arpillera con el fin de prevenir la migración de finos, estas se muestran en la Figura 2.19.



Figura 2. 19 Columnas de acrílico utilizadas en los ensayos (Peña, 2019).

- Soporte de madera y columna de PVC: Se utilizó para depositar el material al interior de la columna de acrílico, como se muestra en la Figura 2.20.

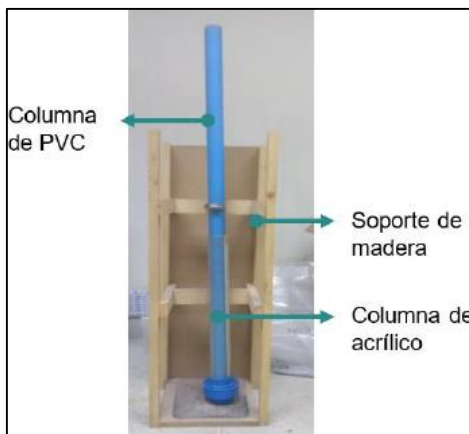


Figura 2. 20 Soporte de madera y columna de PVC (Peña, 2019).

- Micropipeta: Se utilizó para medir el ácido sulfúrico que se utilizó en la preparación de la solución ácida.
- Matraz aforado de 2 litros y 250 ml.
- Vasos precipitados.
- Ácido sulfúrico con una pureza de 95-97%

#### Investigación 4:

- Doscientas libras de calcosina de baja ley (0,25%  $Cu_2S$  y 42%  $SiO_2$ ), con una granulometría de 85% pasante de malla 0,635 cm.
- Poliacrilamida de diferentes cargas iónicas.
- Botella rociadora.
- Ácido sulfúrico.
- Balde.
- Malla Tyler 10 (1,7 mm).
- Columna de acrílico.

#### Investigación 5:

- Mineral de cobre extraído de la mina Zijin en Fujian, China. La distribución de tamaño de partícula es la siguiente: 10% en peso de partículas más finas de 0,074 mm y 51% en peso de partículas más finas de 1,6 mm.
- Metacaolín preparado mediante la calcinación de caolinita lavada a 800°C en aire durante 6 horas.
- Activadores alcalinos: Silicato de sodio e hidróxido de sodio.
- Caja de plástico
- Solución ácida de pH 1.

### **Procedimiento**

*Opción 1: A pesar de que no se realizó, se muestra lo que se había establecido para llevarla a cabo*

#### Separación de muestras

Las muestras de ripios se someterán a un cuarteo para obtener la mayor homogeneidad y representatividad posible, después de esto se deberán separar en cantidades iguales para finalmente añadirle los distintos aglomerantes.

#### Uso de aglomerantes

Una vez separadas las muestras se procederá con el uso de los aglomerantes, esto se realizará en el tambor aglomerador de laboratorio, la cantidad de aglomerante y el tiempo que la combinación aglomerante-mineral deberá permanecer en el tambor está directamente relacionado con las características de los ripios y también de los aglomerantes, posterior a esto se procederá con el proceso de curado que también dependerá del tipo de mineral utilizado.

#### Pruebas de eficacia

Una vez definido el tiempo de curado se procederá con cada una de las pruebas para determinar cuál es el mejor aglomerante, a excepción de la inspección visual, la cual, deberá ser realizada cuando los aglomerados aún permanezcan en el tambor y también de la prueba de remojo, en la que, el tiempo de curado se hará en el tamiz.

- Test de permeabilidad: Para esta prueba se requerirá el uso de un permeámetro de carga constante, en el cual, se añadirán los aglomerados y la finalidad es medir el flujo laminar a través de los aglomerados, además se requerirá de la utilización de la ecuación de la Ley de Darcy.
- Distribución de tamaño: Mediante la utilización del tamizador Ro- Tap se realizará una curva granulométrica que mostrará la cantidad de finos presentes después del uso de los aglomerantes.
- Inspección visual: Se llevará a cabo la prueba del guante, la cual, consiste en tomar una muestra desde el tambor aglomerador y verificar que, si existe la presencia de agua en este (guantes) después de depositar la muestra en el suelo significa que la muestra posee gran contenido de humedad.
- Ensayos de conductividad eléctrica: Para este ensayo se empleará el multímetro, el cual, medirá la resistencia de la muestra, se espera que los resultados sean directamente proporcionales a la cantidad de humedad presente en la muestra aglomerada.
- Pruebas de remojo: El mineral se introducirá en un tamiz de Tyler N° 10 y se dejará curar aproximadamente 24 horas, a continuación de esto se llenará un balde con solución lixivante

y la malla Tyler con el mineral se sumergirán lentamente, estos se dejarán sumergidos por un tiempo determinado, luego se retirará el tamiz con el material, posteriormente se decantará la solución que quedó en el balde, finalmente se secará y pesará el material fino que pasó a través del tamiz.

- Prueba de percolación de columna inundada: Los aglomerados se colocarán en una pequeña columna (75 mm de diámetro) para posteriormente curarlos. El agua / solución se agrega en la parte superior de la columna a un ritmo que inunde o cause una situación de desbordamiento dentro del lecho de mineral. Las tasas de flujo más altas someten al material mineral a condiciones más duras como las que prevalecen en la lixiviación en pilas. Se mide el caudal de la solución a través de la columna, para determinar la permeabilidad del lecho de mineral, que está relacionada con la cantidad de espacio vacío.

### Comparación de aglomerados

Una vez que se obtuvieron todos los resultados de todas las pruebas, se procederá a comparar los aglomerados en cada una de las pruebas.

### Lixiviación

El paso final del estudio será la prueba de lixiviación, la cual, será realizada durante el período que se estime conveniente para el tipo de ripio que se esté trabajando, esta prueba se realizará para medir realmente la eficacia del aglomerante que se eligió como mejor, cabe destacar que para la lixiviación se utilizará ácido sulfúrico.

*Opción 2:*

### Investigación 1:

En primer lugar, se caracterizó la muestra proveniente las operaciones de cobre de la mina Zaldívar ubicada en Chile, el tamaño de partícula y los análisis mineralógicos se muestran en la Tabla 2.1. La Figura 2.21 expone la distribución de partículas de la muestra.

Tabla 2. 1 Mineralogía de la muestra de alimento del mineral de cobre utilizado para los experimentos de aglomeración (Kodali *et al.*, 2011) (Elaboración propia).

Tamaño de partícula	Análisis químico de la ley de cabeza de Cu	Análisis mineralógico				
		CuFeS <sub>2</sub>	Cu <sub>2</sub> S	CuS	CuSO <sub>4</sub> ·3Cu(OH)	Otro
mm	%	%	%	%	%	%
24.5 x 19.1	1.21	0.40	85.00	-	14.10	0.50
19.1 x 12.7	1.16	1.10	82.60	-	15.20	1.10
12.7 x 9.5	1.26	13.20	71.70	-	15.10	-
9.5 x 6.36	1.25	-	82.50	-	17.50	-
6.36 x 3.18	1.31	7.00	75.60	0.80	15.80	0.80
3.18 x 1.7	1.30	6.20	76.90	0.70	15.40	0.80
1.7 x 0.425	1.29	3.80	77.30	-	18.90	-
0.425 x 0.150	2.33	8.00	75.60	0.20	16.20	-
0.150 x 0.075	2.99	4.30	81.50	0.20	14.00	-
-0.075	2.67	2.40	85.00	0.40	8.70	3.50

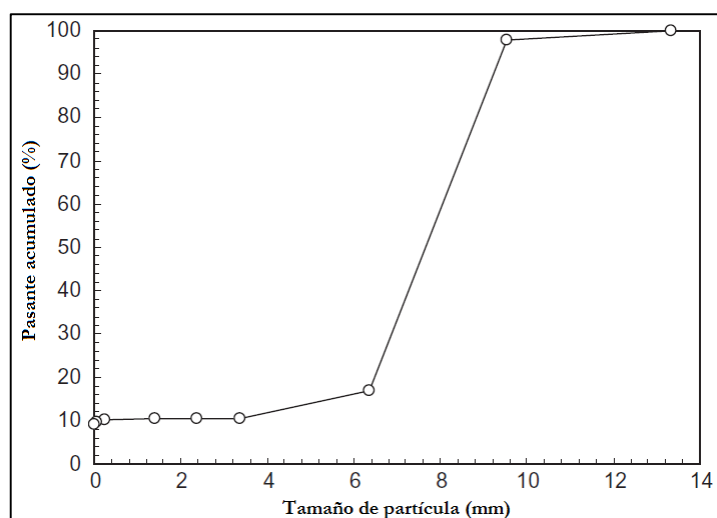


Figura 2. 21 Distribución del tamaño de partícula del alimento para experimentos de aglomeración (Kodali, 2010).

Luego de esto se introdujo la muestra en el tambor aglomerador, cabe destacar que se realizaron distintas pruebas con diferentes contenidos de estuco, en este caso se utilizaron 0 gramos, 50 gramos, 100 gramos, 250 gramos y 500 gramos (Kodali, 2010). Los aglomerados recién formados se secaron al aire a 30°C durante 24 horas para obtener muestras aglomeradas secas, luego estas se tamizaron en un agitador Ro-Tap durante 3 minutos a una velocidad muy baja, esto se realizó con cada uno de los contenidos de estuco (Kodali *et al.*, 2011).

Para realizar la prueba de permeabilidad se utilizó una columna cilíndrica con el fin de contener la muestra de aglomerados, que se colocaron entre dos placas perforadas (orificios de aproximadamente 3 mm de diámetro) (Figura 2.22). Los mármoles se emplearon en la parte inferior y superior de los aglomerados en la columna para ayudar a mantener el lecho de aglomerados y un flujo uniforme. Se mantuvo una altura de agua constante durante el experimento. El volumen de agua de la descarga de



la columna se midió a diferentes alturas para los cálculos de permeabilidad (Kodali, 2010). El coeficiente de permeabilidad se calculó a partir de la pendiente del gráfico de la tasa de flujo frente al cambio de altura y utilizando la ley de Darcy (1).

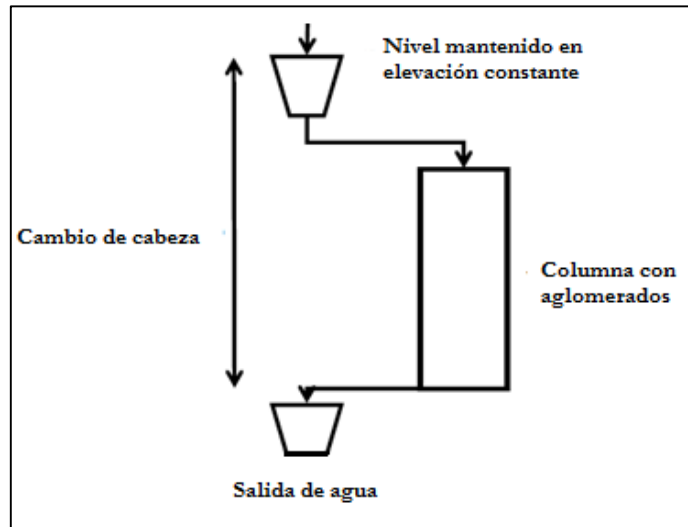


Figura 2. 22 Esquema de la prueba de Permeabilidad (Kodali, 2010).

En cuanto a la lixiviación, los aglomerados que se prepararon con 500 g de estuco y 0 g de estuco se cargaron en columnas (Figura 2.23) para determinar el efecto del aglomerante de estuco sobre la recuperación de cobre durante la lixiviación de columna. Mientras se preparaban los aglomerados, la cantidad de solución ácida (80% de agua y 20% de ácido sulfúrico concentrado) y la cantidad de material de alimentación (10 kilos) se mantuvieron constantes. Se colocaron pantallas de tela y polímero sobre los aglomerados en las columnas, de modo que la solución de lixiviación pudiera distribuirse uniformemente en la columna. Se añadieron canicas y una pantalla de polímero en la parte inferior de las columnas para evitar que los aglomerados rotos bloquearan la salida de la columna. También, se utilizaron sistemas intravenosos (IV) para alimentar la solución de lixiviación (6 g / l de ácido sulfúrico) en las columnas a un caudal controlado de  $8 \text{ L} / \text{m}^2 / \text{h}$ . La lixiviación de columna se realizó durante 112 días y el PLS se recogió a intervalos de tiempos regulares.



Figura 2. 23 Columnas cargadas con los aglomerados (Kodali, 2010)

### Investigación 2:

- Para comenzar el análisis primero se realizó un roleo con el propósito de tener una muestra representativa, luego se utilizó el partidador de rifles para dividir la muestra y por último se masó el material para obtener muestras de 250 gramos.
- Luego de esto se armó la columna, se colocó la arpillera en la base de esta y se introdujo la muestra de material en ella con el tubo de PVC para que la muestra sea lo más homogénea posible, posterior a esto se retiró el tubo y se ubicó un vaso precipitado para recoger la solución percolada.
- Se realizaron dos pruebas de permeabilidad, la primera se realizó en medio no saturado, en esta primero se registró la altura del lecho mineral, luego se vertieron 200 ml de solución de ácido sulfúrico en la columna y en el momento en que se vertió la última gota se anotó la altura que alcanzó en la columna, después se tomó el tiempo con un cronómetro y se registró el tiempo que demora en descender la solución, finalmente cuando no se observó solución en el lecho se midió y se anotó el volumen de solución percolada que se recolectó en el vaso precipitado. La segunda prueba de permeabilidad en medio saturado se realizó de la siguiente manera, una vez saturado el lecho mineral se repitió el proceso anterior.

### Investigación 3:

El fin de este estudio es aglomerar ripios con contenido de cobre con otros ripios sin contenido de cobre, la mezcla será de 70%- 30% respectivamente, se nombró como RSC al ripio sin contenido de cobre y como RCC al que si tenía cobre.

A diferencia de las dos investigaciones anteriormente descritas, esta no se realizó en un laboratorio, sino que la investigación fue realizada en una planta, en esta primero se realizaron sondajes en los ripios para identificar el material con el cual se trabajará, la forma que se utilizará para mezclar ambos ripios es la que se muestra en la Figura 2.24, donde RCC será de 7 metros y RSC tendrá 3 metros, al tomarlos con la pala, se mezclarán y posterior a esto se depositarán en otro lugar y se formará la pila.

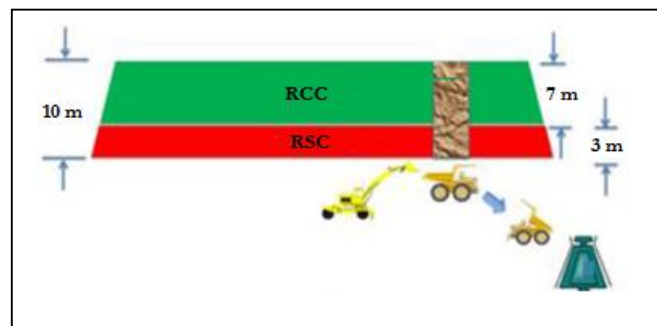


Figura 2. 24 Estrategia de mezclado.

Se utilizó un Simulador Hidrodinámico FLUX para generar un modelo de escurrimiento líquido a través de lechos porosos de saturación variable, con el cual se obtuvieron resultados de humedad, ciclo de riego, etc., a este simulador se le cargaron una serie de datos, entre ellos análisis granulométrico, porosidad y densidad, por lo cual, se necesitó saber con exactitud los resultados de estos.

#### Investigación 4:

#### **Distribuciones de tamaño y composición de la muestra**

En primer lugar, se necesitaban muestras idénticas tanto en distribuciones de tamaño como de composiciones, para esto se seleccionó toda la muestra recibida y se dividió en cinco fracciones de tamaño como se ve en la Tabla 2.2, cada una de estas fracciones se dividió en submuestras utilizando un divisor rotatorio, además estas se pesaron para asegurar que todas tuvieran pesos idénticos. Las muestras experimentales se prepararon combinando una submuestra de cada una de las cinco fracciones de tamaño, estas muestras experimentales resultantes tenían distribuciones de tamaño

idénticas a las de la muestra de mineral original. La composición de la muestra se analizó mediante la difracción de rayos X (XRD), espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) y microscopía ocular (OM), esto se muestra en la Tabla 2.3. Una vez terminado el proceso de división de muestras se tuvieron muestras experimentales de 500 gramos cada una.

Tabla 2. 2 Distribución del tamaño del mineral de cobre utilizado en experimentos (Kawatra & Lewandowsky, 2009b) (Elaboración propia).

Fracción de tamaño de mineral	% Fracción de tamaño
+ 1/4 pulgadas (+ 6350 $\mu\text{m}$ )	1,3% $\pm$ 0,0%
1/4 pulgadas a + malla 4 (-6350 a +4750 $\mu\text{m}$ )	15,2% $\pm$ 0,1%
- malla 4 a + malla 6 (-4750 a +3350 $\mu\text{m}$ )	15,9% $\pm$ 0,1%
- malla 6 a + malla 10 (-3350 a +1700 $\mu\text{m}$ )	20,6% $\pm$ 0,1%
- malla 10 (-1700 $\mu\text{m}$ )	47,0% $\pm$ 0,4%

Tabla 2. 3 Resultados mineralógicos de una muestra de mineral de cobre ((Kawatra & Lewandowsky, 2009b)(Elaboración propia).

Mineral	Peso (%)	Método
Pirita	1,2	XRD
Cuarzo	42	XRD
Moscovita	22	NIR
K-Feldespato	21	XRD
Plagioclasa	5	XRD
Caolinita	4	NIR
Arcilla expansiva	3	NIR
Biotita	1	NIR
Clorita	0,5	NIR
Calcosina / Covelina	0,25	OM
Calcopirita	Traza	OM

### Prueba de remojo

A continuación, se procedió a evaluar la estabilidad de los aglomerados utilizando la prueba de remojo como se muestra en la Figura 2.25, para esto, primero se introdujo la muestra en un tambor de aglomeración y se le añadió el aglomerante líquido o en emulsión y también refino durante 20 minutos. La solución de refino se añadió con una botella rociadora a una dosis de 0,08 ml/g de mineral. Una vez terminado el proceso de aglomeración, se retiraron los aglomerados y se depositaron en una malla

Tyler 10, después de esto, se dejaron curar a temperatura ambiente (20 – 25°C) durante 24 horas. Mientras se curaban los aglomerados, se llenó un balde de 18,9 litros con una solución de 6 gr de ácido sulfúrico/ L de concentración, dando un resultado de pH de 1,8 aproximadamente. Posterior a esto, se introdujo lentamente la malla Tyler con los aglomerados curados en el balde, asegurando que el mineral estuviera completamente sumergido, estos permanecieron durante 30 minutos, luego se retiró cuidadosamente la malla Tyler con el mineral restante y se dejó escurrir. En el balde se dejó sedimentar el material que pasó a través del tamiz de malla 10, esta se decantó para dejar los sólidos, además el material fino se secó y se pesó.

El valor de la migración de finos se calculó a partir de la ecuación (6), por último, el uso de esta prueba de remojo proporciona una evaluación rápida de la capacidad de cada aglomerante para retener finos en sus aglomerados cuando se somete a condiciones ácidas.

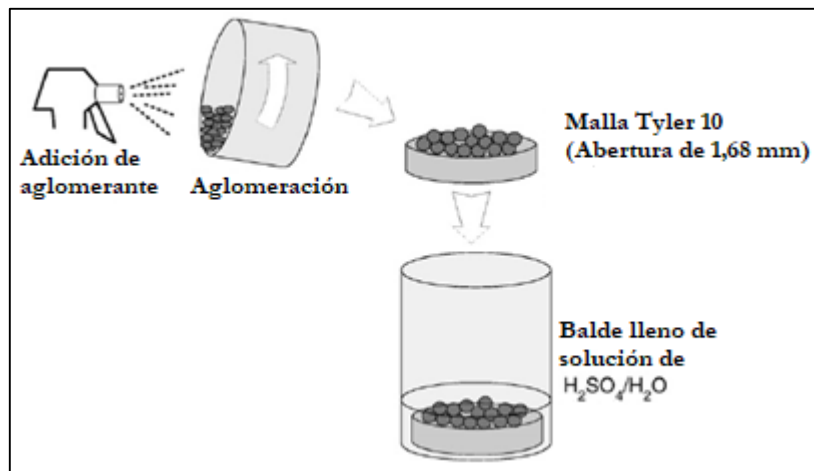


Figura 2. 25 Procedimiento experimental de prueba de remojo (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

## Permeabilidad

En primer lugar, se aglomeraron aproximadamente 1,5 kilogramos de mineral con refino y aglomerante de poliacrilamida. A continuación, se dejó secar al aire o curar el mineral durante 24 horas antes de transferirlo a una columna. La solución de lixiviación se agregó lentamente por sistema de goteo sobre la parte superior del lecho de mineral, donde lentamente comenzó a inundar la columna, saliendo a través de un circuito de desbordamiento. Después de 72 horas, se detuvieron las bombas y se dejó que la solución llegara al equilibrio. Luego, las columnas se dejaron escurrir durante 1 hora antes de vaciarlas y el mineral se colocó en el horno para que se secase. La conductividad hidráulica fue otra medida de la resistencia de los aglomerados. Se puede calcular usando la ecuación de Darcy.

## Lixiviación en columnas

Esta prueba requirió grandes cantidades de mineral y varios meses para completarse y, por lo tanto, fueron las más costosas de esta investigación, el procedimiento que se utilizó para preparar las columnas fue el siguiente:

1. Se aglomeraron aproximadamente 36,29 kg de mineral con refino, utilizando una cantidad de solución de 0,08 ml / gramo de mineral y un aglomerante elegido.
2. A continuación, el mineral aglomerado se dejó secar al aire, o curar, en condiciones ambientales durante 72 horas.
3. Luego, el mineral se distribuyó en la columna.
4. La columna se tapó para crear un entorno controlado.
5. Se conectó una línea de aire a la base de la columna y el caudal de aire se fijó en 16,68 ml / min.
6. El refino se bombeó a la parte superior de la columna a una velocidad de 27,9 ml / h, donde se goteó sobre la superficie del lecho de mineral.
7. El refino se filtró lentamente a través de la columna y se recogió en un balde debajo, como solución de lixiviación preñada (PLS).
8. Se analizó la concentración de cobre y hierro del PLS mediante espectroscopia de absorción atómica, pH, potencial de oxidación / reducción (ORP) y temperatura.

### Investigación 5:

El mineral proveniente de la mina se trituró utilizando rodillos de molienda de alta presión. Luego, se utilizó una criba vibratoria para separar el mineral acorde a sus tamaños, para encontrar los componentes principales de la muestra se usó la fluorescencia de rayos X, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4. Composición química del cobre (Chen *et al.*, 2020).

Componentes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CuO	PbO	ZnO
Masa%	66,41	12,81	15,41	3,53	1,37	0,16	0,19	0,03	0,02

Antes de comenzar con el proceso de aglomeración se mezcló el mineral de cobre con metacaolín en una caja de plástico, luego la mezcla mineral-metacaolín se introdujo en una caja de plástico y se roció rápidamente a mano la solución de activador alcalino, posterior a esto la mezcla resultante se transfirió al tambor para la operación de aglomeración. Para todas las pruebas de

aglomeración, se utilizó una alimentación de mineral de 300 gramos, una velocidad de 60 rpm y un tiempo de aglomeración de 3 minutos. Posteriormente, los aglomerados se curaron primero a 30°C durante 12 horas y luego se curaron a temperatura ambiente durante 36 horas. La Tabla 2.5 presenta las condiciones de preparación de los aglomerados. Finalmente, se midió la distribución de tamaño de los aglomerados mediante cribado manual.

Tabla 2. 5 Condiciones de preparación de aglomerados a base de mineral de cobre (Chen *et al.*, 2020).

Cantidad añadida de metacaolín (Peso %)	Peso del mineral de cobre (g)	Cantidad añadida de activador alcalino (Peso)	Proporción de activadores alcalinos Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :NaOH	H <sub>2</sub> O (mol)
0-5	300	5	4: 1	1,5

Para determinar la estabilidad de los aglomerados en un ambiente ácido se realizó una prueba de remojo a distintos aglomerados con diversos contenidos de metacaolín y además se mantuvieron inalteradas todas las demás condiciones. En esta prueba los aglomerados se sumergieron en una solución ácida durante 24 horas y la estabilidad se expresó en términos de la migración de finos, que se calculó mediante la ecuación (6).

Por último, se realizó la lixiviación en columnas para estimar las recuperaciones de cobre.

## 2.3. Resultados y Análisis

### Investigación 1:

Los resultados de la distribución de tamaño de los aglomerados se expresan en la Figura 2.26, en esta se pudo apreciar que los aglomerados se volvían más gruesos a medida que aumentaba la cantidad de estuco añadido, esto se debe a que el aglomerado se vuelve más grueso por la adherencia de finos, entonces mientras mayor sea la cantidad de estuco habrá menor presencia de finos en la pila.

El valor de P80 para aglomerados con 0 g, 50 g y 100 g de estuco es de aproximadamente 8,5 mm y el P80 para 250 g y 500 g de estuco es de 9,5 mm y 11 mm respectivamente (Kodali *et al.*, 2011).

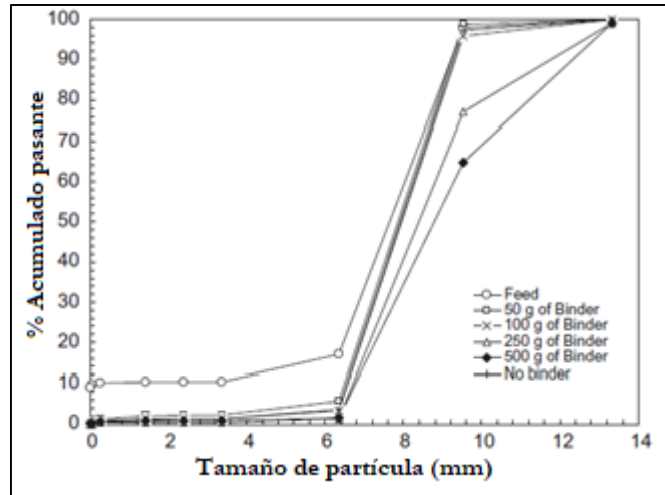
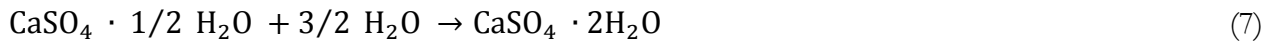


Figura 2. 26 Resultados de distribución de tamaño de partículas de los aglomerados (Kodali et al., 2011).

Teniendo en cuenta este efecto (aglomerados más gruesos cuando se aumenta la cantidad de estuco), se realizaron algunos experimentos para ver si el aumento en el tamaño del aglomerado se debe únicamente a la adición de estuco o al efecto del agua (el agua que se encuentra en la solución de ácido sulfúrico). El estuco reacciona con el agua para dar yeso como se muestra en la Ecuación (7).



Los experimentos de aglomeración se realizaron sin estuco y disminuyendo la cantidad de agua (agua que se estima que es consumida por 500 g de estuco para formar yeso, 3/2 mol de  $\text{H}_2\text{O}$  por mol de estuco). De lo anterior, se desprende de la Fig. 2.27 donde los aglomerados se vuelven más gruesos a medida que aumenta la cantidad de aglomerante a pesar de la disminución de la cantidad de agua. Por lo tanto, queda claro que el aumento en el tamaño de los aglomerados se debe solo a la adición de estuco y no al efecto del agua.



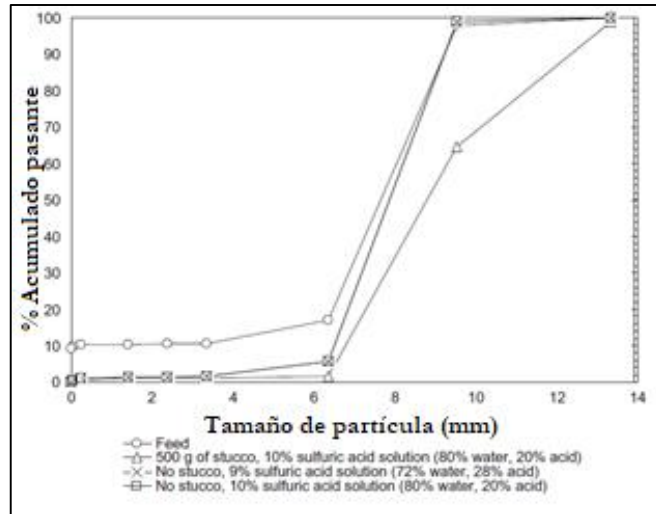


Figura 2. 27 Efecto del contenido de agua sobre el tamaño de los aglomerados (Kodali *et al.*, 2011).

La Figura 2.28 presenta los valores de permeabilidad para los lechos de aglomerados preparados con diferentes cantidades de estuco. En estos experimentos, la cantidad de solución ácida (80% de agua y 20% de ácido sulfúrico concentrado) y la cantidad de material de alimentación (20 libras) se mantuvieron constantes. Los resultados presentados en la Figura 2.28 muestran claramente que la permeabilidad de los aglomerados aumenta con la cantidad de adición de estuco utilizada en el proceso de aglomeración. De hecho, la permeabilidad aumenta cinco veces cuando se utilizan 500 g de estuco en comparación con los aglomerados preparados con 50 g de estuco. Entonces, al aumentar la cantidad de estuco aumenta no sólo el tamaño del aglomerado, sino que también aumenta la permeabilidad de los aglomerados.

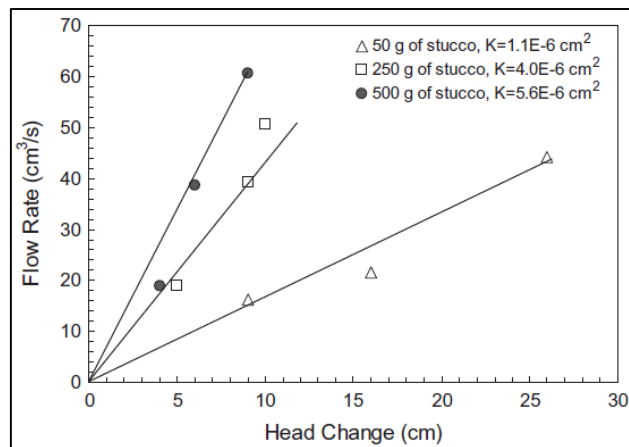


Figura 2. 28 Resultados de la prueba de permeabilidad (Kodali *et al.*, 2011).

Las soluciones de PLS se analizaron utilizando ICP para determinar la re-extracción de cobre de cada una de las dos columnas (0 gramos de estuco y 500 gramos de estuco). Los resultados de la lixiviación en 1 g/ml de cobre en la solución de lixiviación medidos en diferentes tiempos de lixiviación se muestran en la Fig. 2.29. Los resultados de recuperación de cobre muestran que el aglomerante de estuco no inhibe la recuperación, pero, de hecho, mejora la tasa de recuperación de cobre. Se muestra en la Fig. 2.29 que, para las etapas iniciales de lixiviación, se extrae más cobre de la muestra aglomerada con estuco. Luego de las 66 horas las recuperaciones con aglomerante y sin aglomerante no muestran mayores diferencias.

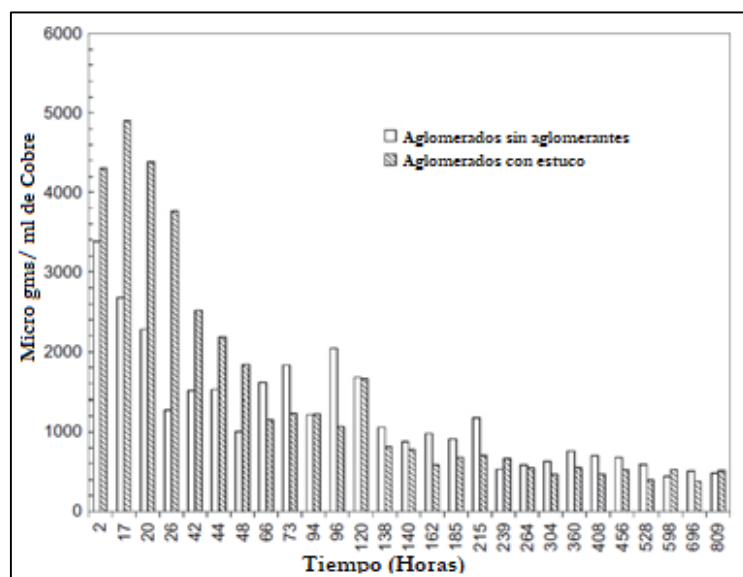


Figura 2. 29 Concentraciones de cobre en PLS en función del tiempo para la lixiviación en columnas de aglomerados sin aglomerantes y aglomerados de estuco (Kodali *et al.*, 2011).

En la Figura 2.30 se muestra una gráfica de la recuperación acumulada de cobre con respecto al tiempo de lixiviación con y sin aglomerante de estuco, estos indican que aproximadamente el 13% del cobre se recuperó durante 33 días (800 h) de lixiviación.

La muestra poseía calcosina, entonces para optimizar de mejor manera se requería un oxidante, por esta razón se agregó sulfato férrico. En la Figura 2.30 se muestra las curvas con sulfato férrico con y sin estuco, la recuperación de cobre es de aproximadamente 44%. Vale la pena mencionar que con la adición de estuco hay un aumento del 5% en la recuperación y, por lo tanto, el estuco parece facilitar la tasa de liberación de cobre.

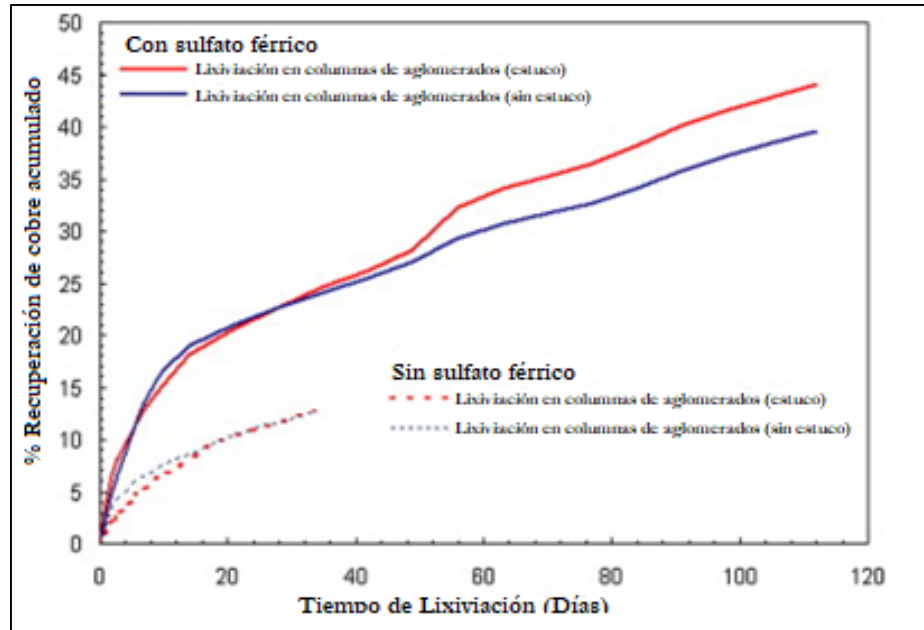


Figura 2. 30 Comparación de recuperaciones de cobre de lixiviación en columnas de aglomerados (Kodali *et al*, 2011).

Investigación 2:

Las pruebas de permeabilidad se realizaron en medio saturado (mineral completamente mojado) y no saturado (mineral completamente seco), estas se realizaron sobre 72 muestras. A continuación, se presenta a modo de ejemplo los resultados que se obtuvieron para una muestra en específico, esta muestra llevó el nombre de M-1. En la Tabla 2.6, Tabla 2.7 y en la Figura 2.31 se muestran los resultados de la muestra M-1 en medio no saturado.

Tabla 2. 6. Tiempo en función de la altura de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia).

H(t) (m)	t(h)
0,22	0:03:07
0,21	0:12:30
0,20	0:23:32
0,19	0:36:31
0,18	0:52:43
0,17	1:09:47
0,16	1:29:34
0,15	1:49:35
0,14	2:12:12
0,13	2:36:33
0,12	3:00:44

Tabla 2. 7 Parámetros prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia)

L (m)	H (0) (m)	Volumen ingresado (mL)	Volumen recibido (mL)	Masa de mineral (g)
0,116	0,230	200	115	250

En la Tabla 2.7 se indica L que es la altura del lecho mineral, H (0) es la altura inicial de la solución percolante y el volumen de solución ingresado a la columna y el del percolado al finalizar la prueba y la masa del mineral utilizada.

La Figura 2.31 muestra un comportamiento prácticamente lineal, lo que indica que la relación de vacíos permaneció constante.

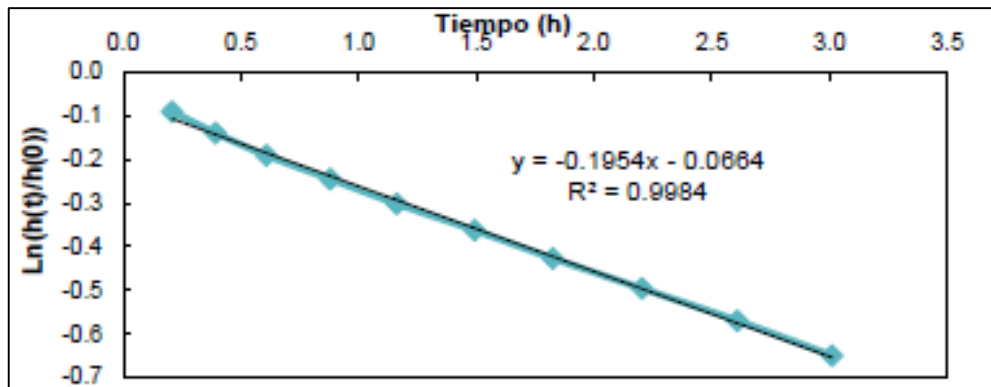


Figura 2. 31 Resultado prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio no saturado (Peña, 2019).

Después de los resultados anteriores, se realizó la medición del tiempo de percolación de la solución ácida a través del medio saturado. Estos resultados se verán reflejados en la Tabla 2.8, Tabla 2.9 y en la Figura 2.32.

Tabla 2. 8 Tiempo en función de la altura de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia)

H (t) (m)	t(h)
0,24	0:02:24
0,23	0:20:28
0,22	0:40:42
0,21	1:04:30
0,20	1:26:50
0,19	1:50:26
0,18	2:16:10
0,17	2:42:00
0,16	3:13:36
0,15	3:46:38

Tabla 2. 9 Parámetros de prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia)

L (m)	H(0) (m)	Volumen ingresado (mL)	Volumen recibido (mL)
0,106	0,243	200	115

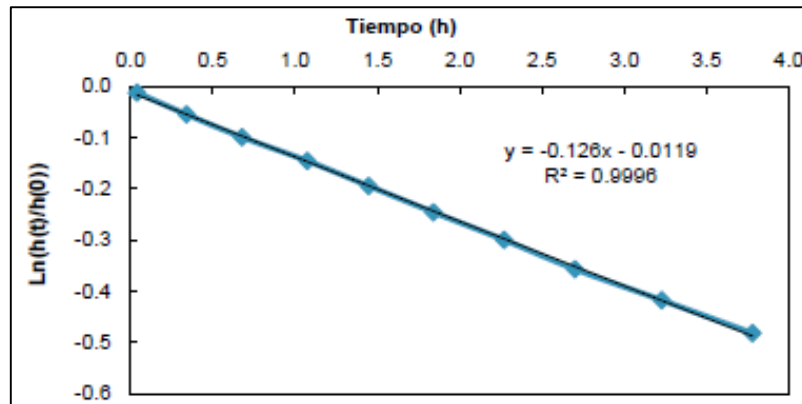


Figura 2. 32 Resultado prueba de permeabilidad de la muestra M-1 en medio saturado (Peña, 2019).

Al comparar las alturas iniciales del lecho mineral en medio saturado y no saturado, se aprecia que este disminuyó, lo que indica que hubo compactación por el posible reordenamiento de las partículas por el estrés. También, el tiempo de percolación aumentó en comparación a la muestra no saturada, esto pudo ocurrir por dos motivos, primero por el reordenamiento de las partículas, ya que estas impiden el flujo a través del lecho y la segunda es porque la relación de vacíos disminuyó debido a que los finos migraron a sitios que antes estaban vacíos.

Entonces, a partir de las ecuaciones de la recta que se presentan en las Figuras 2.31 y 2.32, se obtuvo el valor de  $k$  y  $R^2$ , los cuales se indicaron en la Tabla 2.10, en esta se aprecia que la muestra M-1 mostró mejores resultados conductividad hidráulica cuando estaba en medio no saturado.

Tabla 2. 10 Valores de  $k$  y  $R$  de la muestra M-1 en medio saturado y no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia)

Medio	$k$ (cm/s)	$R^2$
No Saturado	$1,1 \times 10^{-3}$	0,9984
Saturado	$6,5 \times 10^{-4}$	0,9996

Los valores indicados en la Tabla 2.10 concuerdan con la de un suelo con presencia de arena fina y arcillosa, tal como se señala en la Figura 2.8 y corresponde a un suelo con clasificación entre buena y pobre permeabilidad.

Para encontrar el valor de  $K$  se utilizó la ecuación (5), y se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 2.11:

Tabla 2. 11 Valores de  $k$  y  $K$  de la muestra M-1 en medio saturado y no saturado (Peña, 2019). (Elaboración propia)

Medio	$k$ (cm/s)	$K$ (cm <sup>2</sup> )
No Saturado	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-8}$
Saturado	$1,1 \times 10^{-3}$	$6,58 \times 10^{-9}$

Los ensayos de lixiviación se realizaron a temperatura ambiente y se utilizó 500 g de muestra, con una granulometría 100% bajo malla Tyler #10 y una agitación de 24 r.p.m.

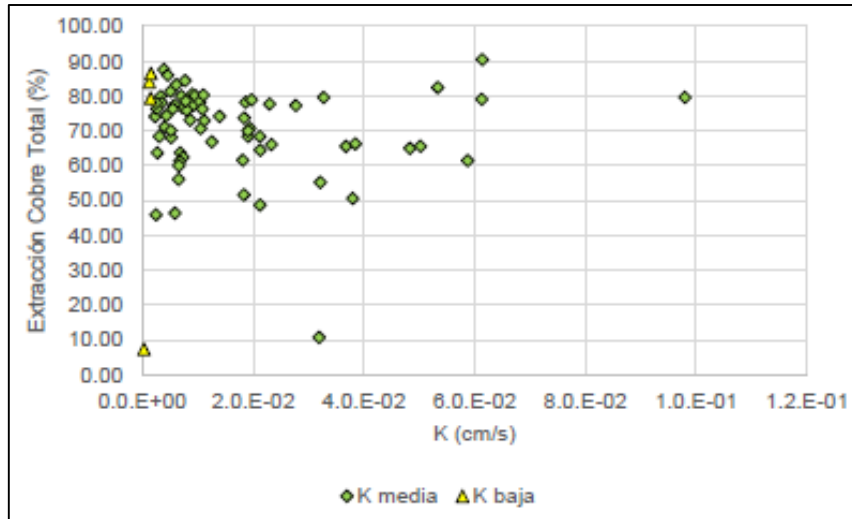


Figura 2. 33 Gráfico de dispersión extracción de cobre total versus permeabilidad (Peña, 2019).

La Figura 2.33 muestra valores de conductividad hidráulica baja y media como  $2,5 \times 10^{-4}$  cm/s y  $3,2 \times 10^{-2}$  cm/s que tienen recuperaciones menores al 20%. Además, se observan muestras pertenecientes al grupo de permeabilidad con recuperaciones que varían entre 40% al 90%.

Como se mencionó anteriormente los resultados presentados (a excepción de la Figura 2.33.) corresponden a una muestra de las 72 existentes, entonces si se consideran las demás muestras los resultados para la conductividad hidráulica van desde  $4,29 \times 10^{-4}$  cm/s hasta  $5,69 \times 10^{-2}$  cm/s.

### Investigación 3:

Los resultados del perfil granulométrico de la muestra son los que se muestran en la Figura 2.34 y el pasante de la malla #100 es un 17, 57% en húmedo.

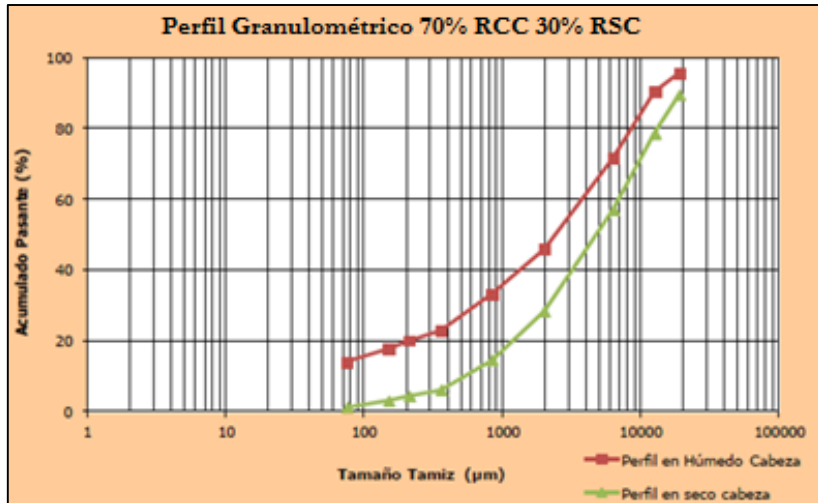


Figura 2. 34 Análisis granulométrico.

En la Tabla 2.12 se muestran las leyes obtenidas en los sondeos realizados a cada uno de los rípios, donde claramente las leyes son superiores en RCC (Ripio con contenido de cobre), los datos de la Tabla 2.13 muestran las leyes que se obtuvieron en la pila ya mezclada con RCC y RSC (Ripio sin contenido de cobre).

Tabla 2. 12 Leyes de RCC y RSC en los sondeos.

Sondajes			
RCC		RSC	
CuT (%)	CuS (%)	CuT (%)	CuS (%)
0,48	0,33	0,2	0,12

Tabla 2. 13 Leyes para la pila 70/30.

Pila 70/30	
CuT (%)	CuS (%)
0,350	0,25

La conductividad hidráulica tanto de RCC y RSC como de la pila 70/30 se muestra en la Tabla 2.14, en esta se aprecia claramente que al aumentar RCC es menos permeable que RSC, y que al mezclarlos aumenta su permeabilidad, pero sigue siendo menor a RSC.

Tabla 2. 14 Conductividad Hidráulica.

	RCC	RSC	Pila 70/30
k (cm/s)	$6,5 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-5}$



Los resultados de estimación en cuanto a tasa de curado y recuperación de cobre son las que se muestran en la Tabla 2.15, la razón de lixiviación es de  $1,6 \text{ m}^3/\text{t}$  y acidez de refino de  $10,7 \text{ g/L}$ .

Tabla 2. 15 Tasa de curado y recuperación de cobre.

Tasa de curado kg/t	Consumo Neto kg/t	Rec de cobre %
11,3	17,7	65,4

#### Investigación 4:

##### **Prueba de Remojo**

Se probó una gran variedad de aglomerantes, entre ellos aniónicos, catiónicos y no aniónicos, utilizando la prueba de remojo para determinar cuál es que produjo los aglomerados con mayor estabilidad, estos resultados se muestran en la Figura 2.35.

La Fig. 2.35 muestra el porcentaje de migración de finos, un alto valor significa que los aglomerados se descomponen al entrar en contacto con el ácido sulfúrico, entonces los que presentaron mejores resultados son los que obtuvieron menores porcentajes de migración de finos, ya que estos indican que los aglomerados se mantienen a pesar de las condiciones ácidas.

Si bien las clases de aglomerantes aniónicos, catiónicos y no iónicos mostraron variaciones significativas en la migración de finos, la mayoría de los aglomerantes de mejor rendimiento fueron catiónicos o no iónicos.

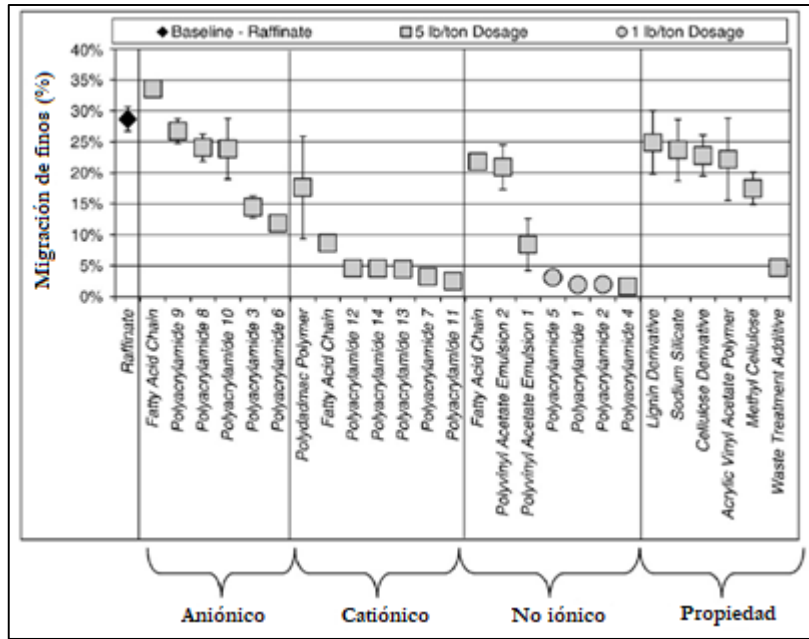


Figura 2. 35 Resultados de la prueba de remojo utilizando una gama de productos con carga iónica variable, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

Luego, se clasificaron en orden de rendimiento los resultados de la prueba de remojo como se muestra en la Figura 2.36 y es evidente que, en general, los aglomerantes de poliacrilamida dieron como resultado la menor migración de finos, destacando la Poliacrilamida 4 como el aglomerante con menor porcentaje de migración de finos.

La prueba aglomerada con refino fue la prueba de referencia, ya que es la que utilizan actualmente en la industria. Cualquier aglomerado que tuviera una migración de finos más baja que la de refino tendría el potencial de producir aglomerados más estables.

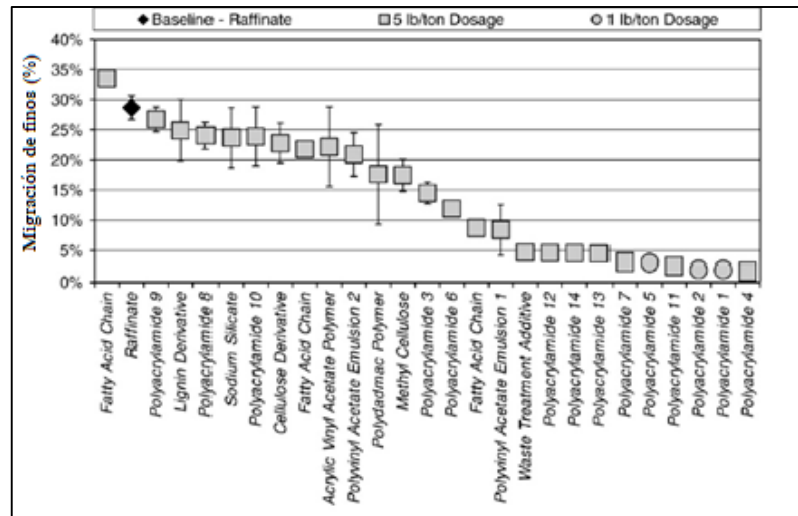


Figura 2. 36 Resultados de prueba de remojo, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

Una razón por la que los aglomerantes de poliacrilamida producen mejores resultados que los aglomerantes restantes se debe a un peso molecular mucho más alto, esto permite que aumente el poder floculante (Kawatra & Lewandowsky, 2009a). Comparando solo el rendimiento de los aglomerantes de poliacrilamida con pesos moleculares altos (pesos moleculares superiores a 1 millón de Daltons), como se muestra en la Fig. 2.37, se hace evidente que las poliacrilamidas catiónicas y no iónicas funcionan mucho mejor que las poliacrilamidas aniónicas, y los aglomerantes de mejor rendimiento fueron todos no iónicos.

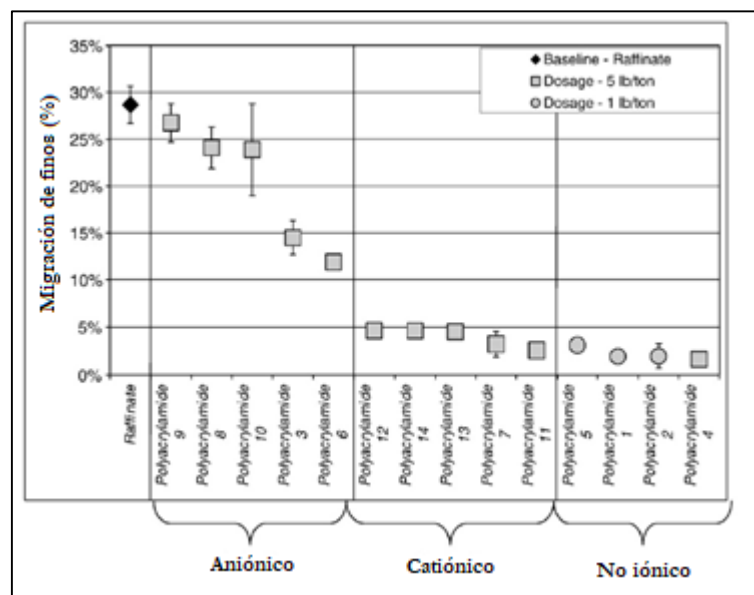


Figura 2. 37 Resultados de la prueba de remojo utilizando una gama de productos de poliacrilamida con carga variable, categorizados según el rendimiento (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

## Puentes de hidrógeno

Además de la atracción electrostática, los aglomerantes también pueden adherirse a las superficies mediante enlaces de hidrógeno. Debido al hecho de que los enlaces de hidrógeno son más fuertes que las fuerzas de van der Waals, se esperaba que se produjeran enlaces de hidrógeno entre el aglomerante y las superficies del mineral.

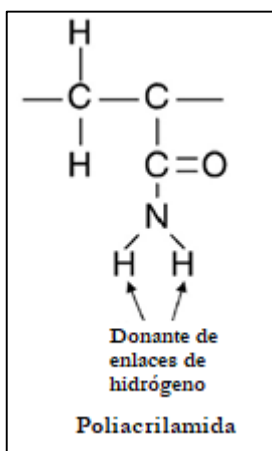


Figura 2. 38 Ejemplo de ubicaciones de donantes de enlaces de hidrógeno en una cadena de poliacrilamida (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

La sílice (SiO<sub>2</sub>) es el componente principal del mineral que se estudió en esta investigación. Cuando se agrega sílice al agua, se produce hidrólisis para formar grupos hidroxilo (OH) en la superficie de las partículas. Los grupos silanol de superficie (-Si - OH) son receptores de enlaces de hidrógeno y se maximizan a un pH de aproximadamente 2. Los donantes de enlaces de hidrógeno se pueden encontrar en las cadenas de poliacrilamida, como se muestra en la Fig. 2.38, y las poliacrilamidas fueron las más efectivas. La poliacrilamida no iónica tiene la mayoría de los sitios donantes de enlaces de hidrógeno, ya que las poliacrilamidas catiónicas y aniónicas se diluirían mediante grupos ionizados. El acetato de polivinilo no contiene sitios donantes de enlaces de hidrógeno, como puede verse en la Fig. 2.39, y no produjo aglomerados tan estables en comparación con la poliacrilamida.

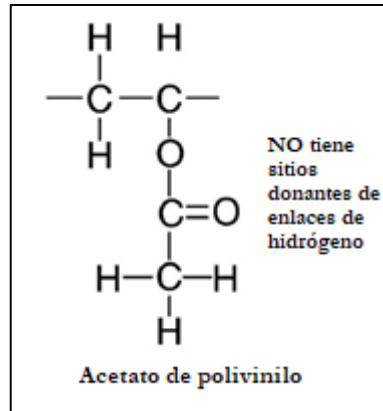


Figura 2. 39 Ejemplo de la falta de ubicaciones donantes de enlaces de hidrógeno en una cadena de acetato de polivinilo (Kawatra & Lewandowsky, 2009b).

Para verificar si era posible que se produjeran enlaces de hidrógeno, se realizó una prueba de remojo comparando un material que tenía sitios aceptores de enlaces de hidrógeno y uno que no tenía sitios aceptores de enlaces de hidrógeno. Cuando la unión de hidrógeno puede tener lugar, debería dar como resultado una menor migración de finos y por lo tanto aglomerados más estables. El mineral rico en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) que se está utilizando en estos experimentos hasta ahora, tiene oxígeno como aceptores de enlaces de hidrógeno que serían atraídos por los donantes de enlaces de hidrógeno de poliacrilamida.

Por tanto, los aglomerados de poliacrilamida producirán aglomerados más estables de mineral rico en sílice que el refino solo.

### Tiempo de Curado

El tiempo de curado de los aglomerados es una consideración importante, esto debido a que el proceso de lixiviación de pilas en la minería generalmente toma aproximadamente 72 horas o más, y una función principal del aglomerante es evitar que los aglomerados se rompan a medida que se secan. Para esta prueba se curó un primer grupo de aglomerados durante 24 horas antes de probarse y se ensayó un segundo conjunto de aglomerados inmediatamente después de la aglomeración. Los resultados, dados en la Figura 2.40, muestran que los aglomerados a los que se les permitió un tiempo de curado liberaron un mayor porcentaje de material fino que los que se ensayaron inmediatamente después de la aglomeración, esto indica que los enlaces se deterioraron a medida que los aglomerados se secaron. En consecuencia, las pruebas se realizaron con tiempo de curado porque de esta manera es más representativo según las condiciones reales de lixiviación en pila.

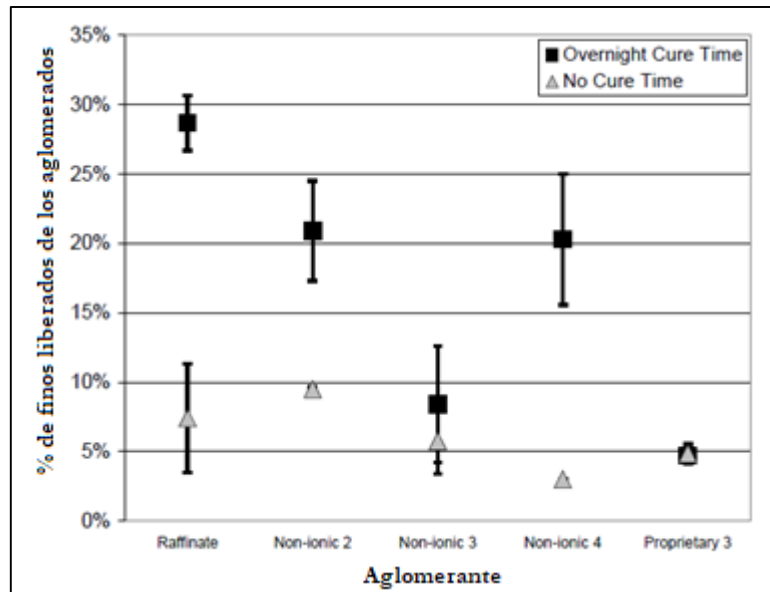


Figura 2. 40 Efecto del tiempo de curado sobre la migración de finos utilizando varios agentes químicos (Eisele *et al.*, 2010).

### Permeabilidad

Los resultados mostraron que el uso de aglomerantes en la aglomeración permitió una mayor conductividad hidráulica sobre la prueba de línea base (uso de refino), Figura 2.41. Una alta conductividad hidráulica indicó que la solución podía fluir fácilmente a través del lecho de mineral. Cuanto más fácil pudiera fluir la solución, mayor era la posibilidad de que pudiera entrar en contacto con todo el mineral, lo que permitiría una mejor oportunidad de recuperación de cobre. El "No-iónico 4" dio los mejores resultados de conductividad hidráulica, el uso de este aglomerante pudo aumentar la conductividad hidráulica del mineral aglomerado a aproximadamente 2,5 mm/s (0,25 cm/s), en comparación con una conductividad hidráulica de solo 0,25 mm/s (0,025 cm/s) cuando no se utilizó aglomerante. El "No-iónico 2" volvió a mostrar malos resultados en comparación con el resto de los aglomerantes. Los tres aglomerantes restantes (No-iónico 3, Patentado 3 y Catiónico 1) mostraron conductividades hidráulicas mejores que las del ensayo aglomerado con solo refino y sin aglomerante.

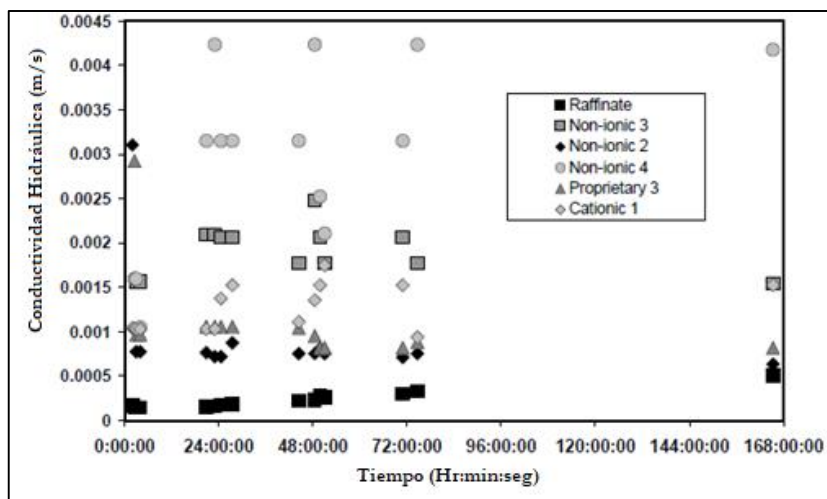


Figura 2. 41 Conductividad hidráulica para los aglomerantes de mejor rendimiento (Eisele *et al.*, 2010)

### Lixiviación en columnas

Los cuatro aglomerantes que obtuvieron mejores resultados en la prueba de remojo y en la de permeabilidad se utilizaron para realizar la prueba de lixiviación en columnas. Estos aglomerantes incluían "No iónico 4" (Poliacrilamida 4), "No iónico 3", "3 Patentado" y el "Catiónico 1". Al mismo tiempo, también se realizó una prueba de referencia, aglomerada con solo refino.

Los resultados de recuperación de cobre, Figura 2.42, indicaron que el uso de aglomerantes en la etapa de aglomeración no tuvo ningún efecto dañino. El único aglomerante que no produjo recuperaciones de cobre mayores que la columna de refino fue el aglomerante "Catiónico 1". El uso del "No iónico 4" en la aglomeración fue capaz de aumentar la recuperación de cobre en un 1,49% en comparación con el uso de refino solo.

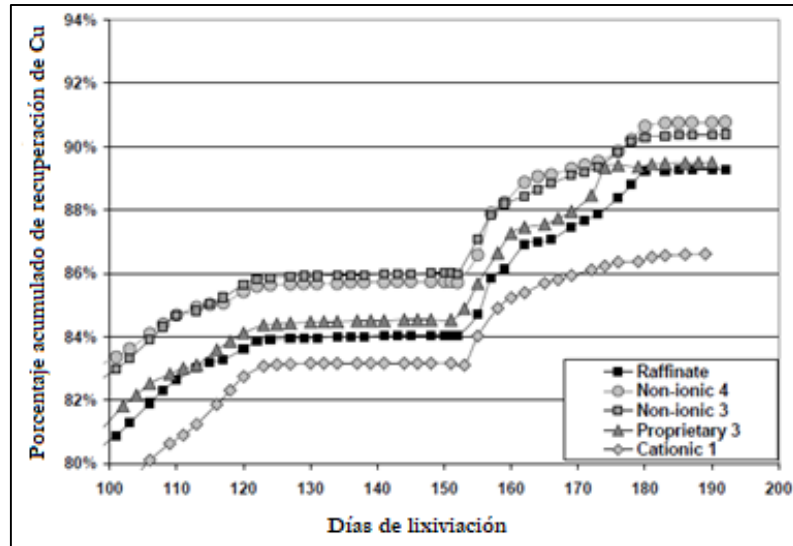


Figura 2. 42 Recuperaciones de cobre de columnas de lixiviación a largo plazo (Eisele *et al.*, 2010).

### Investigación 5:

La Figura 2.43 muestra la distribución de tamaño de partículas de los aglomerados de mineral de cobre con la adición de diversas cantidades de metacaolín. Antes de aglomerar, las partículas finas de tamaño inferior a 1,6 mm representaron el 51,37% en peso (Chen *et al.*, 2020), después de la aglomeración las partículas finas casi desaparecieron, estos resultados indican que esta operación puede promover la formación de aglomerados más grandes. Una distribución de tamaño de aglomerado de 5 a 40 mm es adecuada para lograr una buena permeabilidad (Addhai-Mensah *et al.*, 2013). En este experimento el tamaño de partícula de los aglomerados estuvo principalmente entre 5 mm y 25 mm, lo que fue beneficioso para la mejora de la permeabilidad.



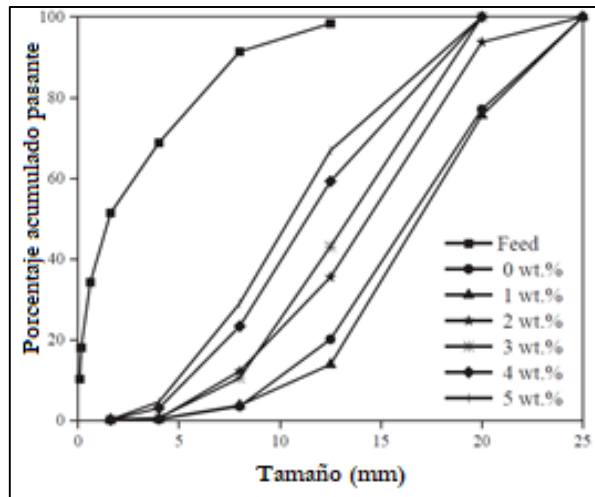


Figura 2. 43 Distribución de tamaño de aglomerados a base de mineral de cobre de baja ley con varios con varios contenidos de metacaolín (Chen *et al.*, 2020).

Con un aumento en el contenido de metacaolín del 0% en peso al 1% en peso, la migración de finos de los aglomerados disminuyó bruscamente del 45,97% al 12,05% como se ve en la Figura 2.44. Luego, la migración de finos aumentó ligeramente con un aumento adicional en el contenido de metacaolín desde el 1% en peso al 2% en peso. Después de eso, la migración de finos volvió a disminuir bruscamente al aumentar el contenido de metacaolín al 3% en peso. Obviamente, el metacaolín mejoró significativamente la resistencia a los ácidos de los aglomerados. El aumento en el contenido de metacaolín añadido del 1% en peso al 2% en peso dio como resultado un ligero aumento en la migración de finos, probablemente debido a una disminución en el tamaño de los aglomerados.

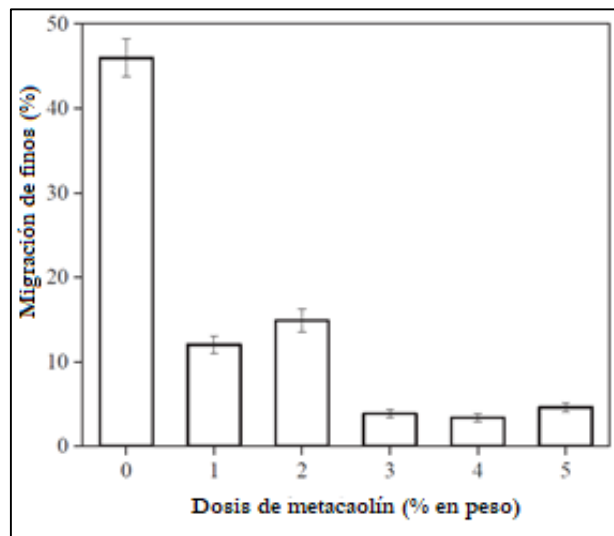


Figura 2. 44 Migración de finos para aglomerados a base de mineral de cobre de baja ley en diversos contenidos de metacaolín (Chen *et al.*, 2020).

La Figura 2.45 muestra que las curvas de aglomerados y mineral de grano grueso tenían buena permeabilidad, además a medida que avanzan los días la permeabilidad comienza a disminuir esto pudo suceder por la desintegración de los aglomerados permitiendo que los finos comenzaran a avanzar por la pila.

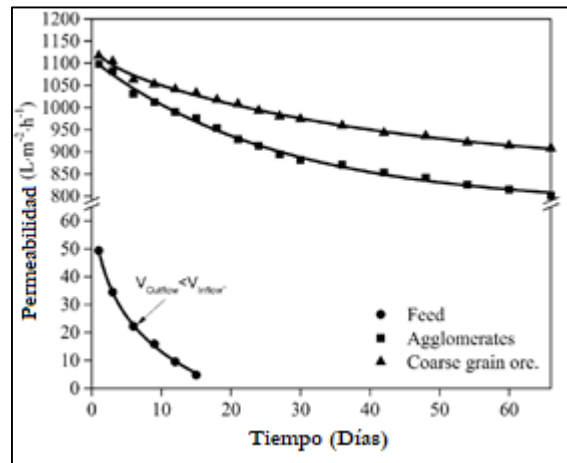


Figura 2. 45 Tasas de permeabilidad de alimento, aglomerados y lecho mineral de grano grueso durante la lixiviación en columnas (Chen *et al.*, 2020).

El mineral de grano grueso no se liberó por completo y la solución lixiviante no pudo penetrar el lecho de mineral fácilmente, lo que resultó en una tasa de lixiviación más baja. La tasa de lixiviación fue solo del 28% después de 66 días. Después de 3 días de lixiviación, el alimento se lixivió más rápido y la tasa de lixiviación alcanzó el 11%, además después de 15 días, la lixiviación se detuvo porque la tasa de permeabilidad era demasiado baja y la tasa de lixiviación alcanzó en total el 28%.

En la Figura 2.46 la tasa de lixiviación de los aglomerados alcanzó el 56% después de 66 días de lixiviación y que la tasa de lixiviación fue significativamente más alta que la del mineral de grano grueso.

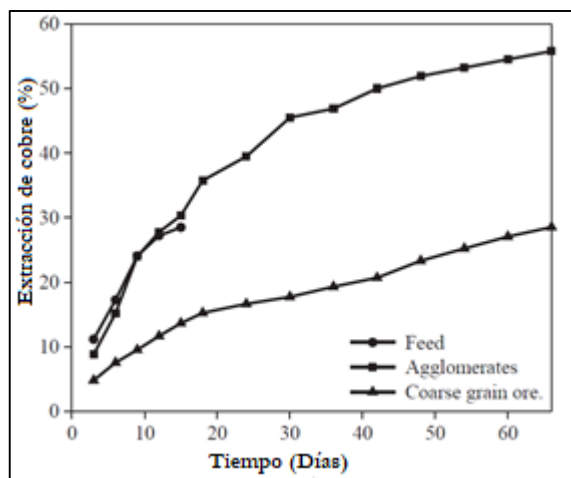


Figura 2. 46 Extracciones de cobre de alimento, aglomerados y lecho mineral de grano grueso durante la lixiviación en columnas (Chen *et al.*, 2020).

## 2.4. Discusiones

En la Investigación 1, se verificó que el estuco es un aglomerante eficaz debido a la reacción de hidratación de este, que ocurre durante la aglomeración del mineral, esta reacción inmoviliza los finos uniéndolos con partículas de mineral más gruesas a través del producto de hidratación de yeso que se forma in situ y sirve para estabilizar los aglomerados formados. Además, al añadir más cantidad de estuco aumentará el tamaño del aglomerado, existían teorías al respecto de que esto se debía al uso del agua, pero se realizaron experimentos y se comprobó que esta teoría era incorrecta. Además, la permeabilidad aumentó a medida que se añadió más estuco, esto quiere decir que la solución lixivante no era capaz de deshacer los aglomerados, entonces el estuco sí resiste medios ácidos. La muestra poseía calcosina, entonces para optimizar de mejor manera se requería un oxidante, es por esto que se agregó sulfato férrico, el que mejoró considerablemente las recuperaciones de cobre, en consecuencia, el estuco no obstaculiza las recuperaciones, sino que de hecho mejora la tasa de recuperación del cobre.

Para el caso de la Investigación 2 en donde el mineral no se aglomeró, la muestra estudiada presentó mejores resultados cuando no estaba saturada, en otras palabras, al estar saturada probablemente los espacios vacíos se llenaron y fue más difícil el paso de la solución a través de la muestra, además la recuperación de cobre no se relaciona con la permeabilidad, es decir que aunque una muestra mostrara los mejores resultados de permeabilidad podría tener muy bajos resultados en la recuperación de cobre, esto pudo significar que si bien la muestra era permeable, la solución lixivante no pasó por o a través de las partículas que sí tenían cobre y al contrario las que tenían baja

permeabilidad quizás sí lixiviaron las partículas que sí tenían alto contenido de cobre. Entonces, no se recomienda el uso de este método por su alta variabilidad.

En la Investigación 3 de aglomeración utilizando rípios de cobre, se aprecia que, si bien el uso de otro rípio permite aglomerar el mineral, la gran cantidad de toneladas de rípios que deben ser removidas y procesadas con el fin de aglomerarlas encarece de sobremanera cualquier tipo de proyecto, por lo que dificulta significativamente el uso de esta alternativa. En relación con la permeabilidad, esta aumentó cuando se aglomeró, lo que significa que hubo una mayor adhesión de finos a las partículas. Si bien, la recuperación de cobre es del 65,4%, el alto costo que significa la aglomeración es un factor importante a la hora de definir qué tipo de aglomerante se utilizará, en consecuencia, la mejor alternativa sería utilizar un aglomerante y no aglomerar con otro rípio.

Luego, la Investigación 4 que corresponde a la poliacrilamida. En esta se realizó la prueba de remojo para estimar la migración de finos, la cual, mostró mejores resultados para los aglomerantes catiónicos y no aniónicos, específicamente el que mostró menor migración de finos fue la poliacrilamida 4. Según Kawatra & Lewandowsky (2009a) los aglomerantes de poliacrilamida producen mejores resultados por su alto peso molecular, esto les permite aumentar su poder floculante. También la fuerza en estos aglomerados proviene de los enlaces de puentes de hidrógeno, ya que la poliacrilamida posee donantes de enlaces de hidrógeno y en especial la poliacrilamida no iónica tiene la mayoría de los sitios donantes de enlaces de hidrógeno, además los aglomerados de poliacrilamida producirán aglomerados más estables cuando exista sílice. En este estudio el tiempo de curado es muy importante, ya que generalmente en la industria minera este tiempo es de 72 horas o más, para esta investigación se realizó una prueba donde se curaron los aglomerados por 24 horas y otro ensayo donde no hubo tiempo de curado, los resultados mostraron que los que sí tuvieron tiempo de curado liberaron mayor cantidad de finos, esto quiere decir que los aglomerados se deterioraron a medida que se secaron. Las pruebas de permeabilidad arrojaron que el no iónico 4 (Poliacrilamida 4) es el más permeable y tiene una conductividad hidráulica de 0,25 cm/s. Y por último la lixiviación en columnas se realizó para vislumbrar cual fue la recuperación de cobre, los resultados demostraron que la poliacrilamida no iónica 4 es la que presenta mejores resultados y aumenta en un 1,49% la recuperación de cobre en comparación a la muestra que solo aglomeró con refino.

Y por último, la Investigación 5 que emplea metacaolín. Al usar diferentes cantidades de metacaolín se reduce la cantidad de finos en comparación a lo presentado por el alimento, el menor contenido de finos lo presentó la muestra que tenía un 4% en peso de metacaolín. La permeabilidad

aumentó cuando se agregó metacaolín, pero a medida que avanzaban los días comenzó a presentar una baja en la permeabilidad, lo que significa que los finos comenzaron a desprenderse de los aglomerados. Para la recuperación de cobre, se compararon tres muestras, alimento, aglomerados y mineral de grano grueso, donde el que mostró una recuperación superior fue la muestra aglomerada y alcanzó un 56% de recuperación después de 66 días.

Entonces, al comparar las recuperaciones de cobre obtenidas de cada una de las cinco investigaciones, las que presentaron mejores resultados son las que utilizaron aglomerantes, en este caso estuco, poliacrilamida y metacaolín, de estos tres el que tuvo mayor recuperación de cobre fue la poliacrilamida no iónica 4 con alrededor de un 91% de recuperación, pero el estuco ni la poliacrilamida han encontrado aplicaciones a gran escala, posiblemente debido a sus desventajas económicas (Chen *et al.* 2020), sabiendo esto el aglomerante que se escogió en esta memoria fue el metacaolín porque puede producir aglomerados adecuados para la lixiviación en pilas ácidas, lo que puede resolver el problema de permeabilidad del mineral de cobre de baja ley con alto contenido de partículas finas o arcillas en la lixiviación en pilas y la recuperación de cobre fue del 56% en 66 días.

### 3. CONCLUSIONES

En esta memoria se realizó un estudio bibliográfico, en el cual se seleccionaron cinco estudios para evaluar el uso de aglomerantes en rípios de cobre, tres de estos estudios se basaban en el uso de aglomerantes, uno en aglomerar con rípios y el último no utilizó la técnica de aglomeración. Cada una de estas investigaciones se comparó mediante los resultados de las técnicas de caracterización y se eligió el mejor. En cuanto a los objetivos específicos, estos fueron cambiando a medida que se fue agotando el tiempo para realizar las experiencias en los laboratorios, entonces todos se concretaron, en cambio el objetivo general nunca se cambió, pero de igual manera se buscó la forma de poder concretarlo.

A partir de la revisión y análisis de los resultados se determinó que los mejores resultados se obtuvieron para los estudios en donde se utilizó aglomerantes, en este caso, estuco, poliacrilamida y metacaolín, sin embargo, cuando no se aglomera el material los resultados obtenidos fueron imprevisibles y cuando se aglomera con rípio encarece de sobremanera el proceso

Los resultados de las pruebas de permeabilidad para el estuco y la poliacrilamida mostraron que la adición de estos aumenta la permeabilidad, para el metacaolín también aumenta, pero llegado un momento comienza a disminuir. La recuperación de cobre utilizando estuco y sulfato férrico es aproximadamente del 44%, para la poliacrilamida “no iónica 4” es del 91% aproximadamente y para el metacaolín es de un 56%, entonces a partir de esto se recomienda utilizar metacaolín a escala industrial, ya que es mucho más económico que la poliacrilamida y menos tóxico. Otra recomendación es realizar este tema de memoria a nivel de laboratorio, ya que es sumamente importante encontrar una solución no solo a nivel bibliográfico y además podría ser un punto de inicio para otros memoristas, visto de esta manera también es recomendable agregar más estudios complementarios a los que ya fueron analizados, puesto que existen un sinnúmero de aglomerantes por investigar.

## 4. REFERENCIAS

- Addhai-Mensah, J.; Nosrati, A. & Robinson, D. 2013. Establishing nickel laterite agglomerate structure and properties for enhanced heap leaching. *Hydrometallurgy*. **Vol. 134-135**: 66-73.
- Angelone, S.; Garibay, M. & Cauhapé M. 2006. Geología y Geotecnia: Permeabilidad de Suelos. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura: 39 pp.
- Bouffard, S. 2005. Review of agglomeration practice and fundamentals in heap leaching. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. **Vol. 26**: 233-294.
- Chen, K.; Yin, W.; Rao, F.; Wu, J.; Zhu, Z. & Tang, Y. 2020. Agglomeration of fine-sized copper ore in heap leaching through geopolymerization process. *Minerals Engineering*. **Vol. 159**: 1-8.
- Dhawan, N.; Miller, J.; Moats, M.; Rajamani, R. & Safarzadeh, M. 2012. Crushed ore agglomeration and its control for heap Leach operations. *Minerals Engineering*. **Vol. 41**: 53-70.
- Eisele, T.; Kawatra, S. & Lewandowski, K.A. 2010. Agglomeration for copper heap leaching. *XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC 2010)*. **Vol. 1**: 183-192.
- Eisele T.; Gurtler, J. & Kawatra, S. 2004. Novel Binders and Methods for Agglomeration Ore. *Semiannual Technical Progress Report*. United States.
- Hill, G. 2013. Agglomeration and leaching of a crushed secondary sulfide copper ore. Thesis for the degree of Master of Science. The University of Utah, Department of Chemical Engineering: 136 pp. Utah.
- Kawatra S. & Lewandowsky, KA. 2009a. Binders for heap leaching agglomeration. *Minerals & Metallurgical Processing*. **Vol. 26**: 1-24
- Kawatra S. & Lewandowski, K.A. 2009b. Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching. *Int. J. Miner. Process*. **Vol. 91**: 88-93.
- Kodali, K. 2010. Pretreatment of copper ore prior to heap leaching. Thesis for de degree of Master of Science. The University of Utah, Department of Metallurgical Engineering: 133 pp. Utah.

- Kodali, K.; Depci T.; Dhawan N.; Wang X.; Lin C.L. & Miller J. 2011. Evaluation of stucco binder for agglomeration in the heap leaching of copper ore. *Minerals Engineering*. **Vol. 24**: 886-893.
- Petersen, J. 2015. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*. **Vol. 165**: 206-212
- Peña, M. 2019. Estudio experimental de la permeabilidad de un mineral oxidado de cobre con presencia de arcillas. Memoria para optar al Título de Ingeniería de Ejecución en Minas. Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas: 94 pp. Santiago.
- Velarde, G. 2005. Agglomeration Control for Heap Leaching Processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*. **Vol. 26**: 219-231.
- Wang, L; Wu, A & Yin S. 2020. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals. *Journal of Cleaner Production*. **Vol 279**: 1-18