



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Blanqueo de caolín por medio de columnas de lixiviación
con ácido clorhídrico”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN MINAS.

Autora:

NELLY DEL CISNE VILLA RUIZ

Director:

ING. FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA–ECUADOR

2023

*“Dale sentido a tu vida! No dejes que ligeros deslices afecten o influyan en tu felicidad.
La vida no es perfecta; de los errores se aprende y se toman como ejemplo para
alcanzar la paz y serenidad. “*

Anónimo

DEDICATORIA

Este logro lo dedico con mucho cariño a mis padres Gustavo y Nelly, quienes han sido el motor en mi vida; enseñándome a perseverar y a creer en mi ante las adversidades que se presenten en el camino, siendo mi ejemplo incansable de lucha y constancia, demostrándome que mientras haya vida podemos alcanzar hasta el cielo.

A mi querida Cruz, que ha sido mi protectora incondicional y me ha dado tranquilidad al estar lejos de mis padres, sabiendo que están en buenas manos.

A mis hermanos Lenin, Omar y Gustavo que nunca han dejado de creer en mis capacidades y han estado presentes de una u otra forma en este caminar que hoy ha sido culminado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, pilar fundamental de mi vida, quien me ha ayudado a encontrar la calma conmigo mismo, me ha brindado salud y sabiduría para la culminación de este logro.

La mayor gratitud a quienes con su dedicación y esfuerzo me ayudaron a culminar la carrera: a la Universidad del Azuay, a mi director de tesis Ingeniero Fernando Valencia; que supo guiarme de la mejor manera durante esta trayectoria y en el desarrollo de este proyecto, así mismo con singular aprecio al Ingeniero Leonardo Núñez e Ingeniero Eduardo Luna que con sus grandes dotes de docentes y amigos supieron dirigirme de la manera más acertada.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-------------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTOS. | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xi |
| INDICE DE ANEXOS | xii |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 2 |
| CAPÍTULO 1 | 4 |
| MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 1.1 Materiales cerámicos | 4 |
| 1.1.1 Procesos de los materiales cerámicos | 4 |
| 1.1.1.1 Preparación de materiales..... | 5 |
| 1.1.1.2 Técnicas de conformado..... | 5 |
| 1.1.1.3 Prensado | 5 |
| 1.1.2 Tratamientos térmicos..... | 6 |
| 1.1.3 Estructura de los materiales cerámicos. | 7 |
| 1.1.4 Propiedades de los materiales cerámicos. | 7 |
| 1.1.4.1 Propiedades mecánicas..... | 7 |
| 1.1.4.2 Tenacidad | 7 |
| 1.1.4.3 Dureza..... | 8 |
| 1.1.4.4 Rotura por fatiga en cerámicos..... | 8 |
| 1.1.4.5 Módulo de elasticidad..... | 9 |
| 1.1.4.6 Efecto del tamaño de defecto..... | 9 |
| 1.1.5 Propiedades eléctricas | 10 |
| 1.1.5.1 Conductividad eléctrica | 10 |
| 1.1.5.2 Aislamiento eléctrico..... | 11 |
| 1.1.5.3 Propiedad dieléctrica | 11 |
| 1.1.6 Propiedades físicas | 12 |
| 1.1.6.1 Densidad..... | 12 |
| 1.1.6.2 Temperatura de fusión..... | 13 |

| | | |
|------------|--|----|
| 1.1.7 | Propiedades térmicas..... | 14 |
| 1.1.7.1 | Capacidad calórica..... | 14 |
| 1.1.7.2 | Conductividad térmica..... | 15 |
| 1.1.8 | Propiedades magnéticas | 16 |
| 1.1.9 | Propiedades ópticas | 16 |
| 1.1.9.1 | Absorción y transparencia | 17 |
| 1.1.9.2 | Color..... | 17 |
| 1.1.10 | Materias primas cerámicas..... | 17 |
| 1.1.11 | Caolín..... | 18 |
| 1.1.11.1 | Mineralogía del caolín | 19 |
| 1.1.11.2 | Propiedades del caolín | 21 |
| 1.1.12 | Clasificación del caolín | 22 |
| 1.1.12.1 | Caolines primarios | 22 |
| 1.1.12.2 | Caolines residuales..... | 22 |
| 1.1.12.3 | Caolines hidrotermales..... | 23 |
| 1.1.12.4 | Caolines secundarios..... | 23 |
| 1.1.12.5 | Caolines sedimentarios | 23 |
| 1.1.12.6 | Arcillas caoliníferas | 23 |
| 1.1.12.7 | Arcillas caoliníticas..... | 24 |
| 1.1.13 | Métodos de beneficio | 24 |
| 1.1.14 | Aplicaciones industriales del caolín..... | 25 |
| 1.1.14.1 | Industria del papel..... | 25 |
| 1.1.14.2 | Industria de la pintura | 25 |
| 1.1.14.3 | Industria de la cerámica | 26 |
| 1.1.14.4 | Industria de plásticos | 27 |
| 1.1.15 | Impurezas del caolín | 27 |
| 1.1.16 | Blanqueo de caolín..... | 29 |
| 1.1.17 | Aglomeración en el proceso de lixiviación..... | 30 |
| 1.1.17.1 | Tipos de aglomeración..... | 32 |
| 1.1.17.1.1 | Aglomeración por humedad..... | 32 |
| 1.1.17.1.2 | Aglomeración por adherentes | 32 |
| 1.1.17.2 | Características y factores de la aglomeración..... | 32 |
| 1.1.17.3 | Aglomeradores..... | 33 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 1.1.18 | Métodos de lixiviación..... | 34 |
| 1.1.18.1 | Lixiviación In-Situ..... | 35 |
| 1.1.18.2 | Lixiviación en botaderos..... | 37 |
| 1.1.18.3 | Lixiviación por agitación..... | 37 |
| 1.1.18.4 | Lixiviación por percolación..... | 38 |
| 1.1.18.5 | Lixiviación en columnas..... | 39 |
| 1.1.18.5.1 | Principales etapas en el proceso se lixiviación por columnas..... | 40 |
| 1.1.18.5.2 | Preparación de la columna..... | 41 |
| 1.1.18.5.3 | Preparación de la solución lixivante..... | 41 |
| 1.1.18.5.4 | Parámetros del método de lixiviación por columnas..... | 41 |
| 1.2 | Fundamentos físico – químicos de los procesos hidrometalúrgicos..... | 43 |
| 1.2.1 | Termodinámica de sistemas acuosos..... | 43 |
| 1.2.1.1 | Diagramas de Pourbaix..... | 43 |
| 1.3 | Lixiviación ácida para la disolución de hierro..... | 44 |
| 1.4 | Lixiviación con ácido clorhídrico..... | 45 |
| 1.5 | Ácido clorhídrico..... | 45 |
| 1.5.1 | Propiedades químicas..... | 45 |
| 1.5.2 | Propiedades físicas..... | 46 |
| 1.5.3 | Usos y aplicaciones..... | 46 |
| CAPÍTULO 2..... | | 47 |
| DESARROLLO DEL EXPERIMENTO..... | | 47 |
| 2.1 | Caracterización del caolín..... | 47 |
| 2.1.1 | Área superficial específica..... | 47 |
| 2.1.2 | Análisis químico mediante espectroscopía de absorción atómica..... | 47 |
| 2.1.3 | Caracterización física del mineral..... | 48 |
| 2.1.3.1 | Humedad natural..... | 48 |
| 2.1.3.2 | Densidad aparente..... | 48 |
| 2.1.3.3 | Densidad real..... | 49 |
| 2.1.3.4 | Porosidad del mineral..... | 50 |
| 2.1.3.5 | Porcentaje de material con tamaño muy fino..... | 50 |
| 2.2 | Preparación de la muestra..... | 51 |
| 2.3 | Preparación experimental..... | 52 |
| 2.3.1 | Curado y aglomerado..... | 52 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.3.2 | Diseño de las columnas de lixiviación..... | 54 |
| 2.3.2.1 | Columna de lixiviación 1 (0.25 M) | 55 |
| 2.3.2.2 | Columna de lixiviación 2 (0.50 M) | 56 |
| 2.3.2.3 | Columna de lixiviación 3 (1 M) | 58 |
| 2.4 | Finalización del proceso de lixiviación..... | 59 |
| CAPÍTULO 3..... | | 60 |
| ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | | 60 |
| 3.1 | Análisis e interpretación..... | 60 |
| 3.2 | Resultados experimentales..... | 60 |
| 3.2.1 | Lixiviación de hierro | 60 |
| 3.2.2 | Modelo cinético para la remoción de hierro..... | 63 |
| 3.3 | Discusión de los resultados..... | 66 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 69 |
| CONCLUSIONES | | 71 |
| RECOMENDACIONES | | 74 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 75 |
| ANEXOS | | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Clasificación de materiales cerámicos | 4 |
| Fuente: (Muñoz,2018) | 4 |
| Figura 1.2 Tenacidad de los materiales cerámicos | 8 |
| Figura 1.3 Valores típicos del módulo de elasticidad a temperatura ambiente de diferentes materiales..... | 9 |
| Figura 1.4 Densidad de diferentes materiales cerámicos | 13 |
| Figura 1.5 Conductividad térmica en un material cerámico..... | 16 |
| Figura 1.6 Caolín | 18 |
| Figura 1.7 Clasificación de los materiales cerámicos | 18 |
| Figura 1.8 Composición de la caolinita..... | 19 |
| Figura 1.9 Los usos del caolín en la industria. | 27 |
| Figura 1.10 Procesos de beneficios de caolines que promueven la blancura..... | 30 |
| Figura 1.11 Diferentes estados de equilibrio en la formación de aglomerados | 31 |
| Figura 1.12 Equipo aglomerador..... | 34 |
| Figura 1.13 Proceso de lixiviación | 35 |
| Figura 1.14 Lixiviación in-situ | 36 |
| Figura 1.15 Lixiviación por agitación | 38 |
| | 39 |
| Figura 1.16 Lixiviación por percolación | 39 |
| Figura 1.17 Lixiviación por columnas | 40 |
| Figura 1.18 Relación pila-columna en la lixiviación | 40 |
| Figura 1.19 Esquema de lixiviación por columnas | 42 |
| Figura 1.20 Distintos métodos de lixiviación..... | 42 |
| Figura 1.21 Diagrama de Pourbaix para Fe a una concentración desconocida de Fe ... | 44 |
| Fuente: (Contakes, Libretext, 2022)..... | 44 |
| Figura 1.22 Estructura del ácido clorhídrico | 46 |
| Figura 2.1 Material fino..... | 52 |
| Figura 2.2 Material grueso | 53 |
| Figura 2.3 Columnas de lixiviación | 54 |
| Figura 3.1 Cantidad de hierro lixiviado vs tiempo | 62 |
| Figura 3.2 Hierro lixiviado vs concentración..... | 63 |
| Figura 3.3 Modelo cinético para la columna 1 de Fe removido vs tiempo | 64 |
| Figura 3.4 Modelo cinético para la columna 2 de Fe removido vs tiempo | 65 |
| Figura 3.5 Modelo cinético para la columna 3 de Fe removido vs tiempo | 66 |

Figura 3.6 Hierro removido vs tiempo de lixiviación 69

Figura 3.7 Porcentaje de remoción vs concentración del ácido clorhídrico..... 70

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Resistividad eléctrica de materiales cerámicos y orgánicos..... | 10 |
| Tabla 1.2 Constantes dieléctricas para materiales cerámicos y orgánicos | 11 |
| Tabla 1.3 Temperaturas de fusión de los materiales..... | 14 |
| Tabla 1.4 Elementos que se encuentra en el caolín | 20 |
| Tabla 1.5 Composición del caolín | 22 |
| Tabla 1.6 Minerales que proporcionan coloración al caolín..... | 28 |
| Tabla 2.1 Dosificación de mineral en columnas..... | 52 |
| Tabla 2.2 Variables de operación de la columna 1 | 55 |
| Tabla 2.3 Variables de operación de la columna 2..... | 56 |
| Tabla 2.4 Variables de operación de la columna 3 | 58 |
| Tabla 3.1 Lixiviación del hierro en cada columna | 61 |
| Tabla 3.2 Porcentaje de hierro removido..... | 62 |
| Tabla 3.3 Remoción de hierro al día 5..... | 68 |
| Tabla 3.4 Remoción de hierro al día 10..... | 68 |
| Tabla 3.5 Remoción de hierro al día 15..... | 68 |
| Tabla 3.6 Remoción de hierro al día 20..... | 68 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1 Análisis del área superficial del caolín | 80 |
| Anexo 2 Análisis del área superficial del caolín Parte 2 | 81 |
| Anexo 3 Análisis del área superficial del caolín Parte 3 | 82 |
| Anexo 4 Análisis del área superficial del caolín Parte 4 | 83 |
| Anexo 5 Material fino | 84 |
| Anexo 6 Material grueso. | 84 |
| Anexo 7 Aglomeración del caolín para las tres columnas | 85 |
| Anexo 8 Columnas de lixiviación con el ácido depositado. | 85 |
| Anexo 9 Columnas después de 8 horas de lixiviación. | 86 |
| Anexo 10 Recolección de muestras al día 5 | 87 |
| Anexo 11 Recolección de muestras al día 10. | 87 |
| Anexo 12 Recolección de muestras al día 15. | 88 |
| Anexo 13 Recolección de muestras al día 20. | 88 |
| Anexo 14 Análisis de la lixiviación al día 5. | 89 |
| Anexo 15 Análisis de lixiviación al día 10. | 90 |
| Anexo 16 Análisis de lixiviación al día 15. | 91 |
| Anexo 17 Análisis de lixiviación al día 20. | 92 |

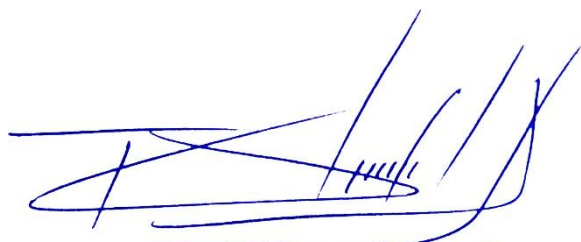
“BLANQUEO DE CAOLÍN POR MEDIO DE COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO CLORHÍDRICO”

RESUMEN

En el presente trabajo se obtuvieron resultados experimentales basados en pruebas de blanqueamiento de caolín mediante lixiviación en columnas de caolín con ácido clorhídrico a escala de laboratorio. El objetivo fue evaluar el proceso de lixiviación, con respecto a la remoción de minerales de hierro que afectan la coloración blanquecina del caolín, con el uso de tres diferentes concentraciones de ácido clorhídrico en un tiempo de 20 días en cada columna. Los valores de lixiviación más altos para las concentraciones de ácido clorhídrico de 0.25 molar, 0.5 molar y 1 molar; se obtuvieron al día 10 con resultados del 9%, 17% y 37%.

El ensayo fue realizado con muestras de caolín provenientes de la Empresa Graiman.

Palabras clave: Blanqueo de caolín, ácido clorhídrico, lixiviación en columnas.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director del trabajo de titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Nelly del Cisne Villa Ruiz.

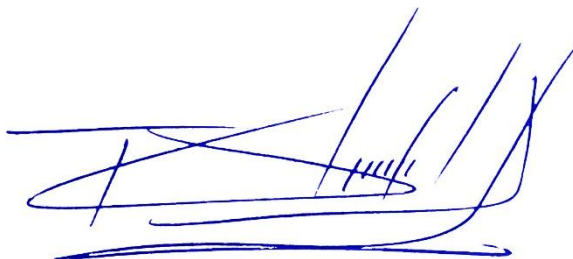
Autora

**“KAOLIN BLEACHING BY MEANS OF HYDROCHLORIC ACID
LEACHING COLUMNS”**

ABSTRACT

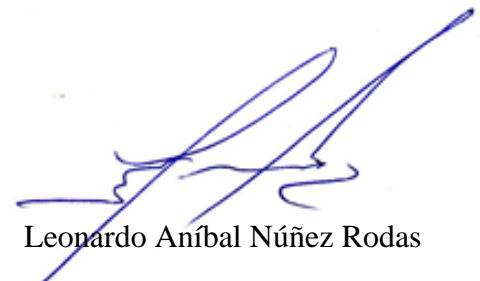
In this research experimental results were obtained, based on tests related to kaolin bleaching by column leaching on a laboratory scale using hydrochloric acid. The objective was to evaluate the leaching process, for the removal of iron minerals that improves the whitish coloration of kaolin, working with three columns at different concentrations of hydrochloric acid for a period of 20 days. The most effective leaching values were at high molar concentrations of hydrochloric acid, that is, at 0.25 molar, 0.5 molar and 1 molar; obtaining removals of 9%, 17% and 37%, respectively. The test was carried out with kaolin samples from de Graiman Company.

Keywords: Bleaching kaolin, hydrochloric acid, column leaching, iron oxide.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director of the Degree Project



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinator of the School



Nelly del Cisne Villa Ruiz.

Author



Translated by



Nelly del Cisne Villa Ruiz.

Nelly del Cisne Villa Ruiz

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Enero, 2023

“BLANQUEO DE CAOLÍN POR MEDIO DE COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO CLORHÍDRICO”

INTRODUCCIÓN

La arcilla se utiliza para la fabricación de diversos productos. El caolín es un tipo de arcilla de color blanco (silicato de aluminio hidratado), formado por la descomposición del feldespato y por la acción del agua, del dióxido de carbono y otros silicatos de aluminio. Esta descomposición se debe a los efectos prolongados de la erosión.

El tratamiento mineral de materiales cerámicos es una rama importante de la industria cerámica que brinda trabajo a diferentes profesionales, y más aun considerando la existencia de gran cantidad de industrias cerámicas al sur del país, lo que ha llamado la atención para analizar posibles métodos para el blanqueamiento de estos materiales y así obtener materias primas más limpias y mejores prestaciones tanto físicas como químicas.

Este proyecto se lo llevó a cabo por la necesidad de encontrar un método que logre el blanqueamiento del caolín, ya que este mineral es de gran importancia como materia prima en el sector de la industria cerámica, por esto la importancia de encontrar un método que ayude a purificar el mineral que está contaminado con óxidos e hidróxidos de hierro que son las impurezas de las arcillas caoliníticas, las mismas que limitan su uso en la obtención de productos cerámicos, ya que la presencia del hierro disminuye el índice de blancura del caolín, dando como resultado arcillas de diferentes coloraciones, dependiendo el contenido de hierro.

Por esta razón se desarrolló una propuesta para la descontaminación del caolín mediante un proceso de lixiviación en columnas con ácido clorhídrico, con el objetivo de reducir los óxidos de hierro, presentes en las arcillas y así obtener una coloración blanca; obteniendo materias primas purificadas y por ende productos cerámicos de alta calidad aptos para competir en el mercado.

Este proyecto de tesis fue de carácter experimental y fue desarrollado a escala de laboratorio. Por lo tanto, este ensayo servirá como fuente de información experimental para una de las empresas más importantes de la industria cerámica como es GRAIMAN, en donde podrán mejorar aún más la calidad de sus productos con el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Materiales cerámicos

Un material cerámico es producto de diversas materias primas como las arcillas; las cuales son obtenidos en forma de polvo o pasta para poder moldearlas y así luego someterlas en un proceso de secado y cocción, provocando que adquieran una consistencia adecuada. (Landín, 2013).

En general, son materiales inorgánicos compuestos por elementos metálicos y no metálicos vinculados químicamente. Pueden ser cristalinos, no cristalinos o una mixtura de ambos. Poseen una alta dureza y resistencia al calentamiento, pero tienden a la fractura frágil. Se caracterizan principalmente por su bajo peso, alta rigidez y baja tenacidad, alta resistencia al calor y al desgaste, poca fricción y buenas propiedades aislantes. (Maldonado, 2019)



Figura 1.1 Clasificación de materiales cerámicos

Fuente: (Muñoz,2018)

1.1.1 Procesos de los materiales cerámicos

Los productos cerámicos más tradicionales y técnicos son fabricados compactando polvos o partículas en matrices. Las cuales son calentadas a grandes temperaturas para enlazar las partículas entre sí.

Según (Smith, 1998), las etapas básicas para el proceso de cerámica de aglomeración de partículas son: preparación de material, moldeado, tratamiento térmico por secado y horneado.

1.1.1.1 Preparación de materiales

La mayoría de los productos cerámicos están fabricados por aglomeración de partículas. Las materias primas que se usan para la elaboración de estos productos son diferentes, ya que dependen de las propiedades que necesiten. Además, las partículas y otros constituyentes tales como aglutinantes y lubricantes pueden ser mezclados en seco o húmedo. Para los productos cerámicos que no necesitan tener propiedades muy específicas tales como ladrillos, tuberías para alcantarillado y otros productos arcillosos, la mezcla de los ingredientes con agua es una práctica común. En el caso de otros materiales cerámicos, las materias primas son tierras secas con aglutinantes y otros aditivos.

1.1.1.2 Técnicas de conformado

Los productos cerámicos fabricados por aglomeración de partículas pueden ser conformados mediante varios métodos, ya sea en condiciones secas, plásticas o líquidas.

1.1.1.3 Prensado

La materia prima puede ser prensada en estado seco, plástico húmedo, dentro de un troquel para formar productos elaborados.

- **Prensado en seco.** - Es la compactación uniaxial simultánea y la conformación de polvos granulados con pequeñas cantidades de agua y/o pegamentos orgánicos. Este método se usa frecuentemente para productos refractarios y componentes cerámicos electrónicos. En el presado en seco, se da el proceso estampado en frío, en donde las partículas son calentadas (sinterizadas), con el fin de que se consiga la fuerza y las propiedades microestructurales deseadas. Este proceso se utiliza

mucho ya que permite fabricar una gran variedad de piezas rápidamente con una uniformidad.

- **Compactación isostática.** - En este proceso el polvo cerámico se carga en un recipiente hermético y flexible llamado cartucho el cual por lo general es de caucho; este se encuentra dentro de una cámara de fluido hidráulico a la que se aplica a presión. La fuerza de la presión aplicada compacta el polvo uniformemente en todas las direcciones, tomando el producto la forma del contenedor flexible. Después de presionar la pieza se pasa por el fuego el cual es un proceso de sinterización para obtener las propiedades microestructurales requeridas.
- **Compresión en caliente.** - En este proceso se consiguen piezas de alta densidad y propiedades mecánicas optimizadas combinando la presión unidireccional como la isostática.
- **Moldeo en barbotina.** - La cerámica se puede moldear mediante este proceso el cual es ideal cuando se requieren realizar piezas de paredes delgadas y complejas con espesor constante.
- **Extrusión.** - Las secciones transversales sencillas y las formas huecas de los materiales cerámicos se pueden producir por extrusión en estado plástico a través de un troquel de embutir (Smith, 1998).

1.1.2 Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico es fundamental en la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos. Entre estos tratamientos tenemos: secado, sinterizado, verificación.

- **Secado y eliminación de aglutinantes.** - El objetivo es eliminar el agua del cuerpo cerámico plástico antes de ser sometida a altas temperaturas, lo que generalmente se realiza a menos de 100°C.
- **Sinterización.** - Proceso el cual tiene como objetivo que pequeñas partículas de un material se mantengan unidas al sólido por difusión. En la fabricación de cerámicas este tratamiento térmico se basa en la transformación de un producto poroso en otro compacto y coherente.
- **Verificación.** - Esta fase vítrea sirve como medio de reacción para que la difusión tenga lugar a menor temperatura que en el resto de los materiales sólidos

cerámicos, en donde la fase líquida se licúa y rellena los poros del material, con un bajo enfriamiento, la fase líquida solidifica para formar una matriz vítrea que une las partículas que no se han fundido (Molina, 2019).

1.1.3 Estructura de los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos por su estructura atómica se dividen en: cristalinos y amorfos.

- **Cristalinos.** - La característica de un sólido cristalino es la periodicidad de su estructura, lo que implica que los átomos sigan un patrón regular y repetitivo, los cuales pueden estar arregladas de maneras simples o muy complejas (Rocha, 2005).
- **Amorfos.** - Se caracterizan por una ordenación atómica en cortas distancias, como es el caso de los vidrios y de los polímeros vítreos (Cabrera, 2011).

1.1.4 Propiedades de los materiales cerámicos

1.1.4.1 Propiedades mecánicas

Generalmente los materiales cerámicos son duros y tienen baja resistencia al impacto. Además, se fracturan ante esfuerzos de tensión. Estos tienen poca elasticidad ya que tienden a ser materiales porosos. En los cerámicos la resistencia a la tensión que soportan los materiales cerámicos varía grandemente, pero en ningún caso soporta los 172 MPa. (Landín, 2013)

La resistencia a la compresión es de 5 a 10 veces superior.

1.1.4.2 Tenacidad

Los materiales cerámicos tienen baja tenacidad, la tenacidad es la resistencia a la ruptura y a las deformaciones, y está representada por el área bajo la curva de tensión-deformación. Al ser esta pequeña (por la falta de una etapa de deformación plástica),

la energía que pueden absorber los cerámicos antes de la ruptura es poca. (Maldonado, 2021)

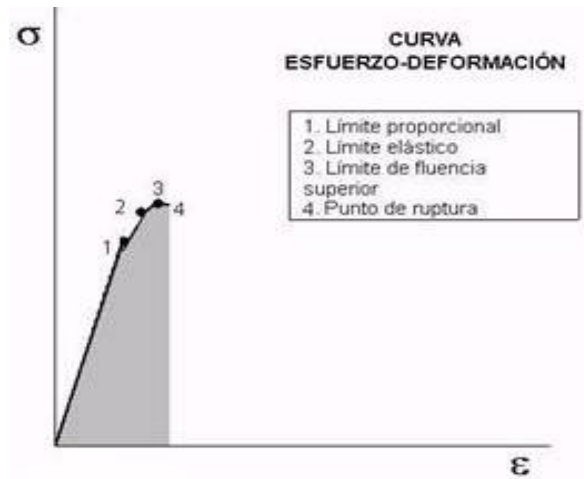


Figura 1.2 Tenacidad de los materiales cerámicos

Fuente: (Landín.2013)

La tenacidad se observa en el área bajo la curva tensión - deformación. A pesar de esto la tenacidad puede aumentarse mediante procesos como la presión en caliente de cerámicos con aditivos y reacciones a de aglutinación. (Garzón , 2018)

1.1.4.3 Dureza

La gran dureza de los cerámicos se debe a sus fuertes enlaces covalentes y es una de sus principales características, por esta razón, suelen ser usados para pulir otros materiales.

1.1.4.4 Rotura por fatiga en cerámicos

Como en los cerámicos hay ausencia de plasticidad al ser sometidos a esfuerzos cíclicos, la fractura por fatiga en materiales cerámicos es poco común, pero existen ciertos casos comprobados como el de alúmina policristalina que a temperatura

ambiente después de 79.000 compresiones cíclicas presenta fisura por fatiga (Steelceram, 2009).

1.1.4.5 Módulo de elasticidad

Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, es decir, es el esfuerzo requerido para producir una deformación elástica unitaria. Los cerámicos poseen un módulo elástico uniforme en todas sus direcciones (Maldonado, 2019).

| Material | Módulo de Young (GPa) |
|--|-----------------------|
| Caucho | 0.0035 – 3.5 |
| Nylon | 2.8 |
| Polimetil metacrilato | 3.5 |
| Urea – formaldehído | 10.4 |
| Grafito | 6.9 |
| Concreto | 13.8 |
| NaCl | 44.2 |
| Aleaciones de Al | 69 |
| SiO ₂ | 69 |
| ZrO ₂ | 138 |
| Mullita | 145 |
| UO ₂ | 173 |
| Hierro | 197 |
| MgO | 207 |
| Aleaciones base Ni | 210 |
| Espinela (MgAl ₂ O ₄) | 284 |
| Si ₃ N ₄ | 304 |
| BeO | 311 |
| Al ₂ O ₃ | 380 |
| SiC | 414 |
| TiC | 462 |
| Diamante | 1035 |

Figura 1.3 Valores típicos del módulo de elasticidad a temperatura ambiente de diferentes materiales

Fuente: (Rocha, 2005)

1.1.4.6 Efecto del tamaño de defecto

La presencia de defectos como las grietas, poros o inclusiones en un material cerámico provoca que exista una concentración de esfuerzos. La combinación de los siguientes defectos causa una reducción muy notoria en la resistencia. (Rocha, 2005)

- Forma del poro.
- Presencia de grietas.
- Distancia entre los poros.
- Distancia entre un poro y la superficie.
- El tamaño y la forma de una inclusión.

1.1.5 Propiedades eléctricas

Los materiales cerámicos se usan en la industria eléctrica y electrónica generalmente como aislantes eléctricos.

1.1.5.1 Conductividad eléctrica

Por lo general la cerámica bloquea la electricidad, pero existen cerámicas semiconductoras que dependiendo de la temperatura que posean y nivel de voltaje aplicado, pueden conducir la electricidad (Steelceram, 2009).

La cantidad de conducción depende de la energía presente, el número de medios de transporte y de la cantidad de disipación. La arcilla muestra una constante dieléctrica muy alta, una propiedad del material relacionada con su comportamiento cuando se encuentra dentro de un campo eléctrico entre dos electrodos, en condiciones estáticas; sin embargo, para la corriente alterna, la constante dieléctrica en la arcilla surge del movimiento de iones y electrones. (Maldonado, 2021)

Tabla 1.1 Resistividad eléctrica de materiales cerámicos y orgánicos

| Material | Resistividad (Ω/cm) |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| SEMICONDUCTORES | |
| Fe ₃ O ₄ | 10 ⁻² |
| SiC | 10 |
| AISLANTES | |
| Arcillas | 40 |
| Ladrillos quemados | 10 ¹⁴ |

Fuente: (Muñoz,2018)

1.1.5.2 Aislamiento eléctrico

Los óxidos puros y los silicatos cerámicos son resistente al paso de electricidad, es decir son buenos aislantes. Sus propiedades como la estabilidad química y térmica han causado un favorable impacto en el uso de estos materiales en diferentes industrias. Por ejemplo, la aplicación de los semiconductores como material aislante en motores de combustión interna (Rocha, 2005).

1.1.5.3 Propiedad dieléctrica

El término dieléctrico se refiere a la polarización que ocurre cuando el material es colocado en un campo eléctrico, los materiales cerámicos son muy usados debido a esta propiedad. En general los cerámicos cristalinos tienen mayor resistencia dieléctrica que los cerámicos policristalinos, es decir que tienen la capacidad de resistir a un campo eléctrico sin que se fracture (Garzón , 2018).

Tabla 1.2 Constantes dieléctricas para materiales cerámicos y orgánicos

| Material | k' (V/mm) |
|--------------------------------|-------------|
| NaCl | 5.9 |
| Mica | 2.5-7.3 |
| MgO | 9.6 |
| BeO | 6.5 |
| Al ₂ O ₃ | 8.6-10.6 |
| TiO ₂ | 15-170 |
| Porcelana | 5 |
| SiO ₂ fundida | 3.8 |
| Vidrio con alto plomo | 19.0 |
| BaTiO ₃ | 1600 |
| Caucho | 2-3.5 |
| Fenoles | 7.5 |

Fuente: (Rocha,2005)

1.1.6 Propiedades físicas

1.1.6.1 Densidad

La densidad es la masa por el volumen que se expresa en cm^3 . Esta propiedad se puede interpretar de las siguientes maneras:

- **Densidad total.** - Es la densidad medida de un cuerpo cerámico que incluye los defectos de red, fases presentes y porosidad.
- **Densidad teórica.** - Tiene el mismo concepto de densidad cristalográfica pero aplicada en soluciones sólidas.
- **Densidad cristalográfica.** - Se considera la densidad ideal que puede ser calculada por la composición de la red cristalina libre de defectos.

En el caso de densidad cristalográfica y teórica definen esta propiedad. Ya que, tienen la característica de porosidad cero, además, la densidad está determinada por el tamaño, el peso de los elementos y por el empaquetamiento de su estructura. (Alonso , 2010)

| Material | Composición | Densidad (g/cm ³) |
|------------------------------|---|-------------------------------|
| Materiales cerámicos | | |
| Oxido de aluminio α | α -Al ₂ O ₃ | 3.95 |
| Oxido de aluminio γ | γ -Al ₂ O ₃ | 3.47 |
| Nitruro de aluminio | AlN | 3.26 |
| Mullita | Al ₆ Si ₂ O ₁₃ | 3.16 |
| Carburo de boro | B ₄ C | 2.51 |
| Nitruro de boro | BN | 2.20 |
| Titanato de bario | BaTiO ₃ | 5.80 |
| Diamante | C | 3.52 |
| Grafito | C | 2.2 |
| Oxido de cerio | CeO ₂ | 7.30 |
| Oxido de cromo | Cr ₂ O ₃ | 5.21 |
| Espinela | MgAl ₂ O ₄ | 3.55 |
| Espinela hierro con aluminio | FeAl ₂ O ₄ | 4.20 |
| Magnetita | FeFe ₂ O ₄ | 5.20 |
| Cordierita | Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ | 2.65 |
| Oxido de magnesio | MgO | 3.75 |
| Cuarzo | SiO ₂ | 2.65 |
| Tridimita | SiO ₂ | 2.27 |
| Cristobalita | SiO ₂ | 2.32 |
| Carburo de silicio | SiC | 3.17 |
| Nitruro de silicio | Si ₃ N ₄ | 3.19 |

Figura 1.4 Densidad de diferentes materiales cerámicos

Fuente: (Rocha,2005)

1.1.6.2 Temperatura de fusión

También se le conoce como punto de fusión y es la temperatura a la cual la materia pasa de estado sólido a estado líquido, es decir, se funde. Es relativamente insensible a la presión y, por tanto, puede ser utilizada para caracterizar compuestos orgánicos y para comprobar la pureza (Ramírez , 2009).

Cuando un sólido cristalino se calienta sus átomos vibran con más energía, además, en cierto momento alcanzan una temperatura a las que estas vibraciones alteran el orden de la estructura cristalina haciendo que los átomos puedan deslizarse uno sobre otros causando que el sólido pierda su forma y se convierta en líquido. Este proceso se llama fusión y la temperatura a la que sucede es la temperatura de fusión (Peña, 2015).

Tabla 1.3 Temperaturas de fusión de los materiales

| Material | Temperatura de fusión (°C) |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Poliestireno | 65-75 |
| Polimetil poliacrilato | 60-90 |
| Polietileno | 120 |
| Nylon | 135-145 |
| Poliamidas | 260 |
| Teflón | 290 |
| Acero inoxidable | 1400-1450 |
| Aleaciones base Co | 1330-1410 |
| Aleaciones base Ni | 1300 |
| Na metálico | 98 |
| Mullita | 1850 |
| SiO ₂ | 1650 |
| Si ₃ N ₄ | 1750-1900 |

Fuente: (Ramírez,2009)

1.1.7 Propiedades térmicas

1.1.7.1 Capacidad calórica

Es la energía requerida para elevar la temperatura de un material y se expresa en cal/mol °C. Esta propiedad en un material cerámico incrementa la temperatura hasta los 1000 °C, después de llegar a la temperatura antes dicha solo se dan incrementos pequeños de la capacidad calorífica. Además, esta propiedad es insensible a la estructura cristalina o a la composición, pero la porosidad tiene mucha influencia en

ella, es decir que entre mayor porosidad hay menor cantidad de material y se requiere menor energía para calentarlo a una temperatura específica (Garzón , 2018).

Es determinada por los efectos de la temperatura en:

- Energía vibracional o rotacional de los átomos en un material.
- Cambio en el nivel de energía de los electrones en una estructura.
- Cambio de las posiciones atómicas durante la transformación de defectos, transición de orden-desorden y orientación magnética

(Navarro, 2014)

1.1.7.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica (k) es la velocidad con que el flujo de calor pasa a través de un material por contacto directo y sin intercambio de materia. Los medios de conducción del calor son los electrones o los fonones. (Coluccio, 2021)

En general, debido a la baja conductividad térmica de los materiales cerámicos, los enfriamientos o calentamientos repentinos generan distribuciones de temperatura heterogéneas en su interior, que introducen importantes tensiones térmicas, provocando la formación de nuevas fisuras o bien la propagación de las ya existentes. Esta formación o propagación de fisuras puede afectar, de modo más o menos determinante a la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos, llegando incluso a provocar su total degradación (Morillas , 2008)

La conductividad térmica es una propiedad importante que sirve para determinar si un material se puede utilizar en ciertas aplicaciones. Bajas conductividades térmicas y alta estabilidad térmica son requeridas en la construcción de hornos utilizados en la producción de muchos materiales indispensables para la vida moderna, tales como el cemento, el acero, el vidrio, el procesamiento de componentes electrónicos, solo por nombrar algunos. La alta conductividad térmica se requiere en los intercambiadores de calor para la conservación de la energía y para el uso de componentes en máquinas y motores que trabajan a altas temperaturas en donde los esfuerzos térmicos deben ser minimizados. (Rocha, 2005)

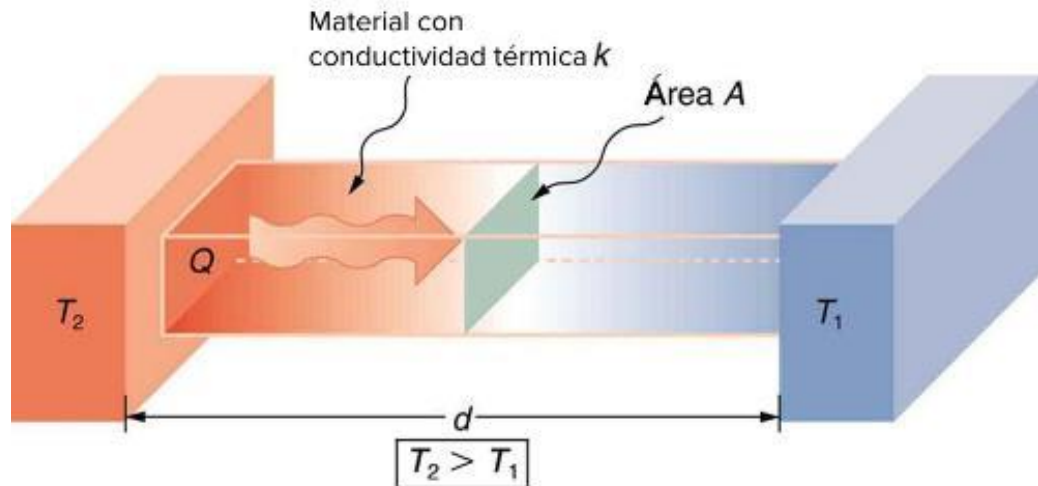


Figura 1.5 Conductividad térmica en un material cerámico

Fuente: (Khan Academy,2016)

1.1.8 Propiedades magnéticas

Los materiales cerámicos que tiene propiedades magnéticas son llamados ferritas. La división de estos depende de la estructura cristalina y la estructura electrónica. Por ejemplo, las ferritas cúbicas pueden tener una estructura de espinela o de granate, así mismo las ferritas hexagonales son muy usadas para la construcción de imanes por su alta magnetización y bajo costo (Garzón , 2018).

La tecnología de los cerámicos magnéticos está muy bien desarrollada en la actualidad. Es por esto que, las propiedades magnéticas de un material pueden ser controladas en el proceso de fabricación. (Universidad Tecnológica Nacional , 2020)

1.1.9 Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas de un material incluyen la absorción de luz, la transparencia, el índice de refracción, el color, y la fosforescencia. Estas propiedades están determinadas principalmente por el nivel de interacción entre la radiación electromagnética y los electrones de la materia.

1.1.9.1 Absorción y transparencia

Son dos propiedades ópticas que están muy relacionadas entre sí, es decir, si la radiación electromagnética estimula a los electrones para moverlos a un nivel de energía más alto, la radiación es absorbida y el material es opaco.

La absorción óptica también puede ocurrir debido a la resonancia, esto se da cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia natural del material. La transparencia óptica es importante en muchas aplicaciones, por ejemplo el vidrio y una gran variedad de cerámicos iónicos son transparentes en el intervalo visible del espectro, esto es el intervalo entre las longitudes de onda de 0.4 a 0.7 μm (Hernández & Sanchez , 1981).

1.1.9.2 Color

Es una propiedad que permite que se den muchas aplicaciones con los materiales cerámicos. El color resulta de la absorción de una amplia longitud de onda de radiación dentro del intervalo visible del espectro.

Los cerámicos colorantes son ampliamente usados como pigmentos de otros materiales para usarse a altas temperaturas, estos materiales son especialmente importantes cuando otro tipo de pigmentos se destruyen a elevadas temperaturas. Por ejemplo, en los esmaltes de las porcelanas que tienen que ser calentados a temperaturas entre 750°C y 850°C (Rocha, 2005).

1.1.10 Materias primas cerámicas

Son los materiales de partida con los que se fabrica el producto cerámico. Los productos cerámicos clásicos, que constituye la “cerámica tradicional”, están preparados con materias primas naturales, que de acuerdo con su función pueden ser elaboradas a partir de plásticos o materiales que no presenten la presencia de plásticos. Las materias plásticas principales son: las arcillas y los caolines, y en menor proporción algunas otras de naturaleza parecida, que contienen minerales arcillosos en cantidades sustanciales, tales como la arcilla compacta, la pizarra arcillosa, margas. (Hernández & Sanchez , 1981).



Figura 1.6 Caolín

Fuente: (Geologíaweb,2008)

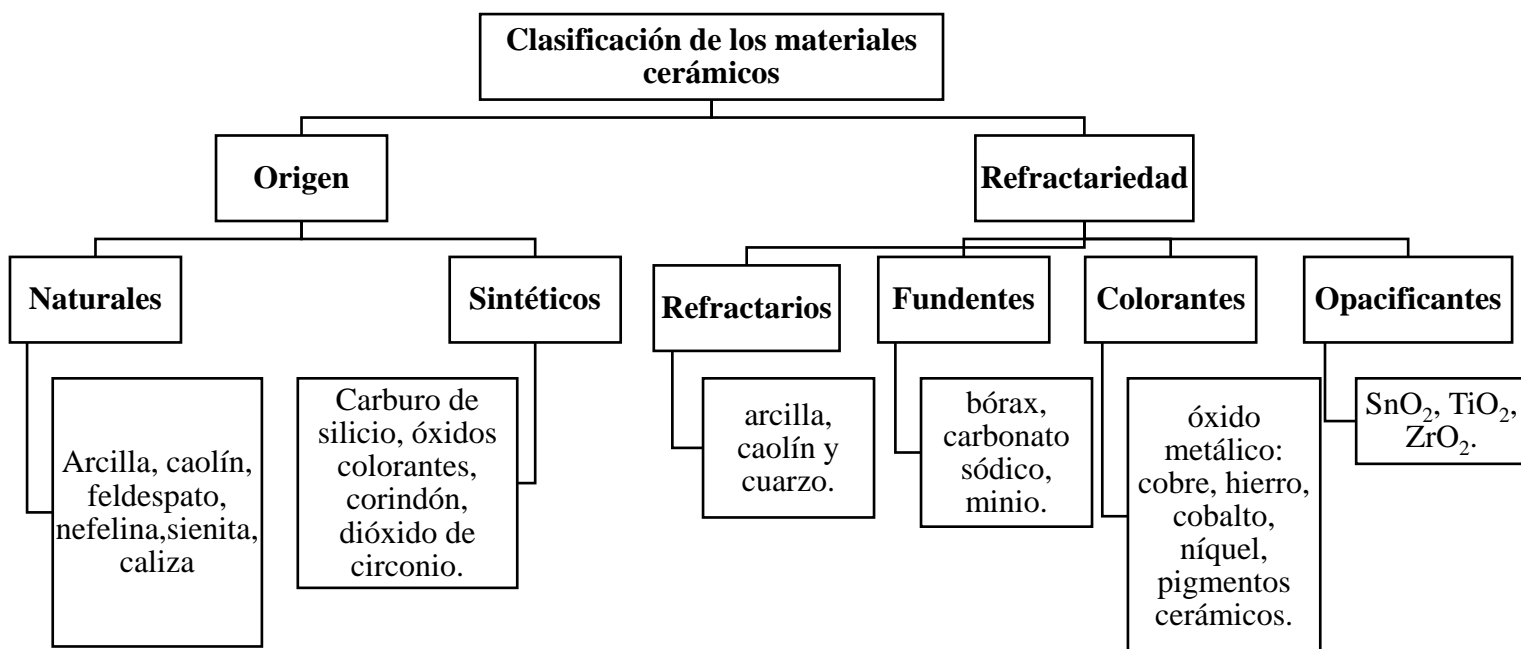


Figura 1.7 Clasificación de los materiales cerámicos

Fuente: (Paredes,2017)

1.1.11 Caolín

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina el mineral caolinita (Vanegas & Hernández , 2014).

Existen grandes yacimientos en países como: Estados Unidos, Inglaterra, Brasil, Indonesia, China, etc., en donde el caolín es extraído y tratado para purificarlo, y así, aprovechar al máximo sus propiedades.

Los caolines de alta calidad son caracterizados por bajos niveles de impurezas como hierro, titanio y minerales de tierras alcalinas, su blandura es importante en muchas aplicaciones al reducir la abrasión de los equipos (Barlomé, 1996).

1.1.11.1 Mineralogía del caolín

Caolinita es el nombre que recibe un mineral del grupo de la arcilla, blanco, silicato aluminio hidratado. Se denomina Caolín a los productos compuestos de caolinita principalmente (Molina, 2005).

Según (Bartolomé, 1997), la fórmula estructural de la caolinita es $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$ y su composición centesimal responde a:

- SiO_2 :46,53 %
- Al_2O_3 :39,49 %
- H_2O :13,98 %

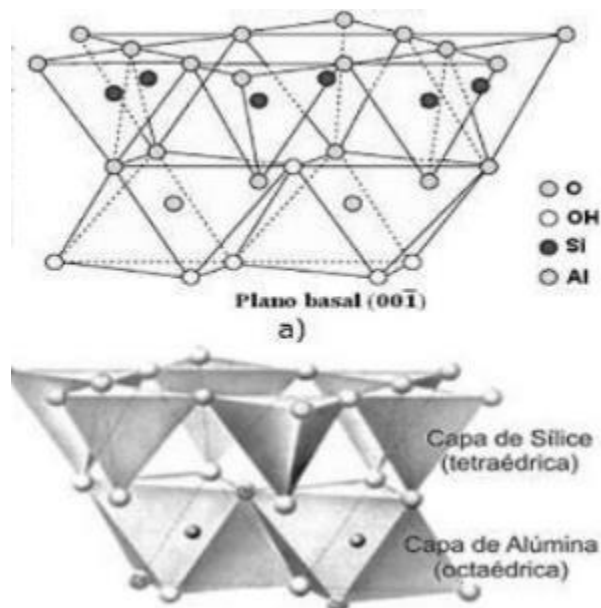


Figura 1.8 Composición de la caolinita

Fuente: (Murray,2007)

La estructura de la caolinita está formada por una capa de tetraedros de sílice y otra de octaedros de alúmina, combinadas de tal forma que los vértices libres de los tetraedros de sílice están en uno de los planos aniónicos de los octaedros. En el plano común a

los tetraedros y octaedros, los 2/3 de los huecos están ocupados por oxígenos y el resto por oxhidrilos. En la capa octaédrica, solamente 2/3 de los huecos están ocupados por aluminios distribuidos hexagonalmente en el centro de las capas.

Ambas capas que forman una lámina miden 7,14 Å de espesor y son continuas, estas láminas se unen mediante enlaces de hidrógeno entre los grupos OH de la capa octaédrica y los átomos de oxígeno de la capa tetraédrica (Vanegas & Hernández , 2014)

Tabla 1.4 Elementos que se encuentra en el caolín

| Elemento | Forma como están compuestos |
|-------------------|------------------------------------|
| Hierro | Óxido de Hierro Fe_2O_3 |
| Aluminio | Alúmina Al_2O_3 |
| Cobre | Óxido de Cobre CuO |
| Potasio | Óxido de Potasio K_2O |
| Sodio | Óxido de Sodio Na_2O |
| Manganeso | Óxido de Manganeso MnO |
| Magnesio | Magnesia MgO |
| Titanio | Dióxido de Titanio TiO_2 |
| Calcio | Cal CaO |
| Silicio | Sílice SiO_2 |
| Sulfuro | Trióxido de Azufre SO_3 |
| Carbón | Dióxido de Carbono CO_2 |
| Hidrógeno-Oxígeno | Agua H_2O |

Fuente: (Muñoz,2019)

El caolín, tal y como se obtiene en una explotación minera, posee un contenido variable en caolinita que, a veces no llega al 20%, puesto que las aplicaciones se basan en la pureza de la materia prima, es preciso someter al material a diferentes procesos mineralógicos que elevan el porcentaje de filosilicatos hasta cotas superiores al 80%.

1.1.11.2 Propiedades del caolín

El caolín es un mineral no renovable, es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas, principalmente.

Es de color blanco, aunque puede tener diversos colores debido a las impurezas; brillo generalmente terroso mate; es higroscópico es decir que absorbe agua, su plasticidad es de baja a moderada. Otras propiedades importantes es su inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión; resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Tiene gran poder cubriente, absorbente y baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos (Vanegas & Hernández , 2014).

Según (Rivera, 2004), es uno de los minerales arcillosos más importantes; su estructura y composición son fundamentales ya que controlan las propiedades físicas y químicas que son importantes en la determinación de sus numerosas aplicaciones industriales.

Tanto la forma como la distribución del tamaño de partícula de un caolín controlan la blancura, opacidad y brillo de una superficie cubierta con este material. Por otro lado, tenemos las propiedades ópticas de este material que se miden en términos de coeficiente de absorción y coeficiente de dispersión, el coeficiente de absorción puede modificarse por diferentes tratamientos químicos y magnéticos, que eliminan en lo posible los óxidos de hierro adheridos a las láminas de caolinita o los minerales como micas y turmalinas, que disminuyen la blancura (Sánchez , 2020).

Tabla 1.5 Composición del caolín

| Composición mineralógica | Yacimiento Primario (In situ) | Yacimiento Secundario (Re depositado) |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|
| Caolinita | 40 % a 80 % | Mayor a 80 % |
| Illita y Mica | 3 % a 20 % | 3 % |
| Feldespato | 1 % a 30 % | Bajo |
| Cuarzo | 10 % a 45 % | Bajo |
| Mineral interestratificado | 3 % a 11 % | Bajo |
| Composición química | Yacimiento Primario (In situ) | Yacimiento Secundario (Re depositado) |
| Al_2O_3 | 12 % a 23 % | 38.4 % a 39.9 % |
| TiO_2 | 0.1 % a 1.2 % | 1.4 % a 1.8 % |
| Fe_2O_3 | 0.2 % a 4.5 % | 0.2 % a 1.9 % |

Fuente: (Muñoz,2019)

1.1.12 Clasificación del caolín

1.1.12.1 Caolines primarios

Los caolines primarios son los que están en yacimientos que se encuentran en depósitos que están producidos de otros minerales como feldespatos y otros silicatos.

1.1.12.2 Caolines residuales

Son los depósitos más abundantes que están formados por rocas meteorizadas que fueron formadas en antiguos ciclos de erosión. La edad de estos depósitos está controlada por la paleogeografía y paleo climatología, más que por la edad de la propia roca madre. En la actualidad las regiones ecuatoriales son las zonas de la tierra con mayor grado de descomposición de feldespatos y otros silicatos aluminicos en granitos

y rocas metamórficas, y en ocasiones otras arcillas y esquistos pueden ser también alteradas rápidamente a una mezcla de caolinita y cuarzo (Barlomé, 1996).

1.1.12.3 Caolines hidrotermales

La alteración hidrotermal es la alteración de las rocas por el agua caliente. En Estados Unidos existe un depósito de haloisita que es usada en la industria del cemento blanco. Se trata de tobas andesíticas terciarias en las que las soluciones termales han formado arcillas a lo largo de fracturas y niveles permeables, sobre fragmentos finos de naturaleza vítrea, preferentemente a los granos cristalinos de mayor tamaño (Sánchez, 2020).

1.1.12.4 Caolines secundarios

La aparición de caolines secundarios se da gracias a la diagénesis. Las arenas caoliníticas pueden ser producto de la alteración de feldespatos en una arena arcósica, por la circulación de aguas superficiales. Además, la meteorización, especialmente en los trópicos puede tener un efecto determinante convirtiendo una arcilla de baja calidad en un provechoso depósito de caolín, aunque en algunos casos estos depósitos pueden tener dos orígenes, primario y secundario. (Barlomé, 1996)

1.1.12.5 Caolines sedimentarios

Este tipo de caolines son los que producen en un 60%. Después de que se le da un apropiado tratamiento se pueden usar para la producción de papel: en Estados Unidos se encuentra un yacimiento que es característico de caolines secundarios, ya que, presenta formas lenticulares. (Narváez, 2008)

1.1.12.6 Arcillas caoliníferas

Existen varios tipos de arcillas caoliníferas utilizadas para la fabricación de materiales cerámicos refractarios, entre ellas las llamadas arcillas refractarias de alto valor industrial.

Dentro de este grupo pueden incluirse las denominadas:

- **Arcillas caoliníferas plásticas.** - También conocidas como ball clay, son dispersables en agua, de color grisáceo o negras, aunque al cocer cambian a blanco. Son considerados los materiales más interesantes para la fabricación de cerámica blanca de gran calidad y estas, se depositan en los lagos o en las zonas de desbordamientos de ríos estando frecuentemente asociados con lignitos.
- **Las fire-clays o arcillas refractarias.** - Debido a que suelen tener óxidos de hierro, este tipo de arcillas no se encuentran en color blanco. Están generalmente asociadas con el nivel de carbón. Algunas fireclays tienen en su composición una notable cantidad de hierro y titanio que hace que no sean rentables para su explotación por su pobre brillo luego de cocerse. Algunas arcillas tienen lignitos asociados
- **Las flint-clays o arcillas caoliníferas duras.** - Debido a que carecen de plasticidad, se utilizan principalmente para la fabricación de materiales refractarios silicoaluminosos. (Navarro, 2014)

1.1.12.7 Arcillas caoliníticas

Se puede extraer el caolín a partir de arenas que tienen un contenido menor al 20% de este material. Estas arenas se usan en la construcción y en ciertas industrias, algunas arenas caoliníticas se forman por la alteración de los feldespatos de una arcosa, por la circulación de aguas superficiales, otros son originalmente depositados como una mezcla de caolín y arena (Barlomé, 1996)

1.1.13 Métodos de beneficio

El mineral de caolín se procesa para mejorar sus propiedades dentro de un rango específico determinado por la aplicación de uso final. El procesamiento se puede dividir en tres tipos básicos: húmedo, seco y térmico.

El tratamiento en seco es un proceso sencillo, que consiste en varias etapas, la primera es una etapa de secado, luego una de molienda y finalmente una clasificación para aislar las partículas perjudiciales. Por lo general, el procesamiento en húmedo se utiliza

en caolines con contenidos superiores de alúmina, este proceso es más complejo que el anterior, atravesando por procesos de molienda, agitación, centrifugación, filtrado y secado. El procesamiento térmico se utiliza para la cerámica y la pintura (Vergara , 2019)

1.1.14 Aplicaciones industriales del caolín

1.1.14.1 Industria del papel

Es una de las aplicaciones más importantes, ya que el caolín hace que la superficie de la hoja sea más suave y blanca. Algunas clases de papel contienen sobre el 30% en peso de pigmentos minerales de los cuales una gran proporción es caolín. La demanda de caolines para papel ha sido importante, aunque en los últimos años ha aumentado el uso de pigmentos alternativos como los carbonatos de calcio. Los caolines de carga son relativamente baratos y pueden tener una aceptable abrasión y propiedades ópticas. Se utilizan para la producción de papeles ácidos y papeles que contengan pulpa no refinada químicamente (Muñoz, 2010).

Los caolines necesitan tener una consistencia reológica, unas propiedades ópticas y unas propiedades que den consistencia al papel recubierto. Para conseguir estos fines se elaboran dos tipos de caolín con especificaciones muy estrictas como: contener un 90% de caolinita, al menos un 60% de partículas inferiores a 2 μm y blancura superior al 82% (Barlomé, 1996).

1.1.14.2 Industria de la pintura

La pintura es un mercado de gran importancia para el caolín, aunque menor que el mercado del papel. Alrededor de 600000 toneladas anualmente son utilizadas mundialmente para elaborar los pigmentos para las pinturas.

El principal uso es como extensor de pigmentos de pinturas de látex a base de agua.

1.1.14.3 Industria de la cerámica

Los cerámicos incluyen un amplio rango de productos en los cuales el caolín es utilizado. Estos incluyen vajillas, sanitarios, azulejos, porcelanas, cerámica y refractarios. Los caolines son el principal ingrediente de los productos cerámicos y sus propiedades son variables ya que dependen de:

- Composición de la arcilla.
- Distribución de tamaño de partícula.
- Presencia de materia orgánica.
- Composición del mineral no arcilloso.

La composición de la arcilla mineral es el factor más importante ya que determina las propiedades del cerámico. La caolinita es la arcilla mineral más utilizada en las aplicaciones cerámicas debido a sus propiedades físicas y químicas que son impartidas al procesamiento de los cerámicos y a los productos finales. Las propiedades más importantes que imparten el caolín a los cerámicos es la plasticidad, resistencia en verde, resistencia en seco, resistencia a la cocción, color, refractariedad, fácil vaciado o colada en los sanitarios, baja o cero absorción de agua y control en el encogimiento o contracción (Narváez, 2008).

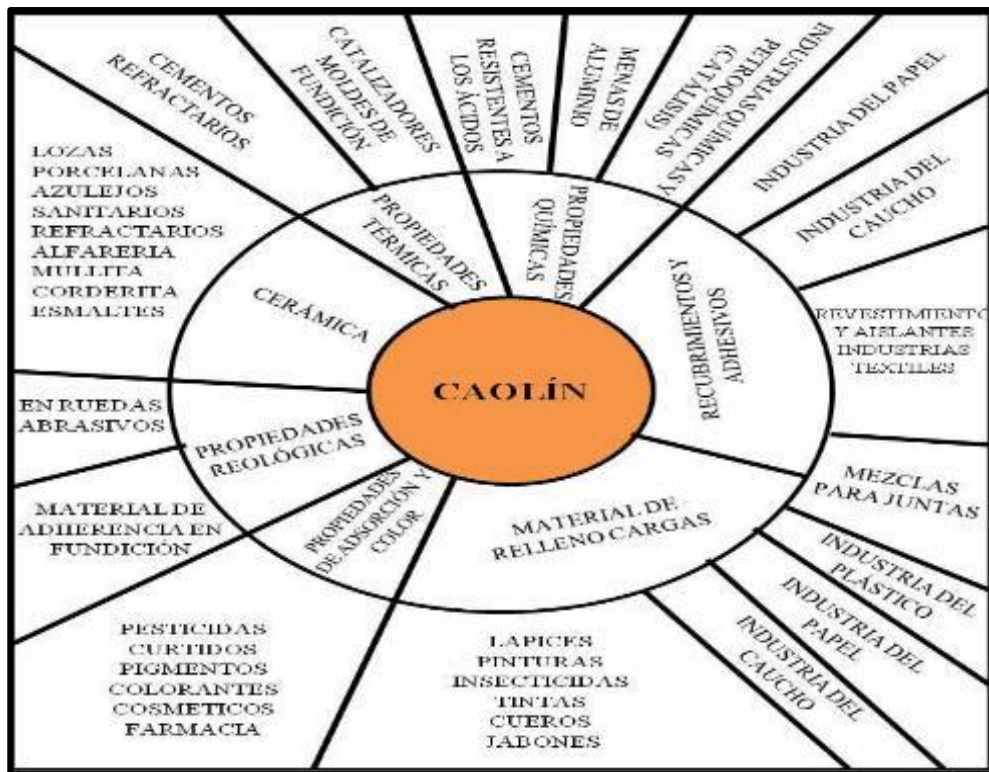


Figura 1.9 Los usos del caolín en la industria.

Fuente: (Barry,2014)

1.1.14.4 Industria de plásticos

El caolín es utilizado como relleno de plásticos ya que ayuda a producir un acabado superficial liso, reduce el agrietamiento y la contracción durante el curado, oscurece el patrón de fibra de vidrio cuando se utiliza como refuerzo, mejora la estabilidad térmica, contribuye a una alta fuerza de impacto, mejora la resistencia al ataque químico y al desgaste y ayuda al control de las propiedades de flujo. El uso más importante del caolín es en el cloruro de polivinilo (Cordinación general de minería, 2014).

1.1.15 Impurezas del caolín

La presencia de impurezas, particularmente el hierro, imparte color al caolín, afectando su utilidad para sus diversas aplicaciones. Generalmente, la calidad del caolín está medida en términos del contenido de hierro, además, ese material esta regularmente acompañado de algunos minerales de hierro como son: hematita, magnetita, goethita,

maghemita, pirita, etc. Estos óxidos e hidróxidos disminuyen el índice de blancura del caolín, dando como resultado arcillas de coloración café-amarillo (beige), dependiendo del contenido de hierro.

Los óxidos e hidróxidos de hierro se pueden encontrar como fases separadas del mineral o adsorbidos en la superficie de éste (hierro coloidal). La presencia del hierro coloidal, usualmente como óxido hidratado, afecta notoriamente el color del caolín, su remoción es dificultosa debido a que está adsorbido fuertemente sobre la superficie del mineral.

Los procesos empleados para eliminar el hierro del caolín son: separación magnética de alta energía, flotación por espuma, floculación, biolixiviación y lixiviación, con este último método se puede remover completamente el hierro, pero también provoca el colapso de su estructura. En este proceso se trata el caolín con ácidos con el fin de reducir los óxidos de hierro y blanquear las arcillas contaminadas (Reyes, 2012).

Tabla 1.6 Minerales que proporcionan coloración al caolín

| Mineral | Estructura |
|----------------------|--|
| Anatasa | TiO ₂ |
| Goethita | $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$ |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ |
| Ilmenita | Fe ²⁺ Ti ⁴⁺ O ₃ |
| Magnetita titanífera | Fe _{3-x} Ti _x O ₄ |

Fuente: (Muñoz,2010)

En el colín se pueden encontrar los siguientes compuestos de hierro:

- Óxido ferroso FeO
- Óxido férrico Fe₂O₃
- Óxido magnético Fe₃O₄
- Sulfuro ferroso SFe
- Sulfuro férrico S₂Fe
- Carbonatos e hidróxidos
- Ferro-silicatos y Ferro-aluminosilicatos

- Sales solubles especialmente SO_4Fe

La calidad del caolín esta medida generalmente en términos del contenido de hierro y regularmente el caolín está acompañado de algunos minerales de hierro como son: hematita, magnetita, goethita, maghemita y pirita entre otros. Estos óxidos e hidróxidos disminuyen el índice de blancura del caolín, dando como resultado arcillas de coloración café-amarillo (beige), en dependencia del contenido de hierro.

1.1.16 Blanqueo de caolín

El blanqueo de caolines es un proceso de disolución selectiva de minerales de hierro adheridos a la superficie del mineral de caolinita. Este proceso inicia con el acondicionamiento del pH (<3) de un sistema de pulpa mineral generando condiciones de estabilidad termodinámica en estado acuoso de minerales de hierro como hematita, goethita y su especie iónica estequiométrica (Fe^{+3}) y termina con la adición de un agente reductor fuerte que promueve la formación de iones ferroso (Fe^{+2}) en un proceso de óxido-reducción (Bustamante , 2014)

La eficiencia en el proceso de blanqueo es susceptible a:

- Características fisicoquímicas del caolín.
- Impurezas minerales e iónicas.
- Variables operacionales.
- Porcentaje de sólidos.
- Distribución de tamaño promedio de las partículas en suspensión.
- Tiempo del proceso.
- La concentración del agente reductor.
- Temperatura.

El blanqueo de caolín, a través de la disposición de columnas de mineral, que son irrigadas por soluciones lixiviantes que mantiene en solución acuosa a complejos metálicos. Este proceso consiste en la disolución selectiva de minerales de hierro controlando tanto el pH, se usa un ácido fuerte como lo es el ácido clorhídrico. La

morfología de la columna permite que dicha solución lixiviante vaya acomplejando el ion disuelto formando complejos en fase acuosa y se promueva un posterior escurrimiento en lecho poroso a través de la columna de mineral, que, por acción del ácido clorhídrico gravedad, dicha solución descienda a través de la columna (Muñoz, 2010).

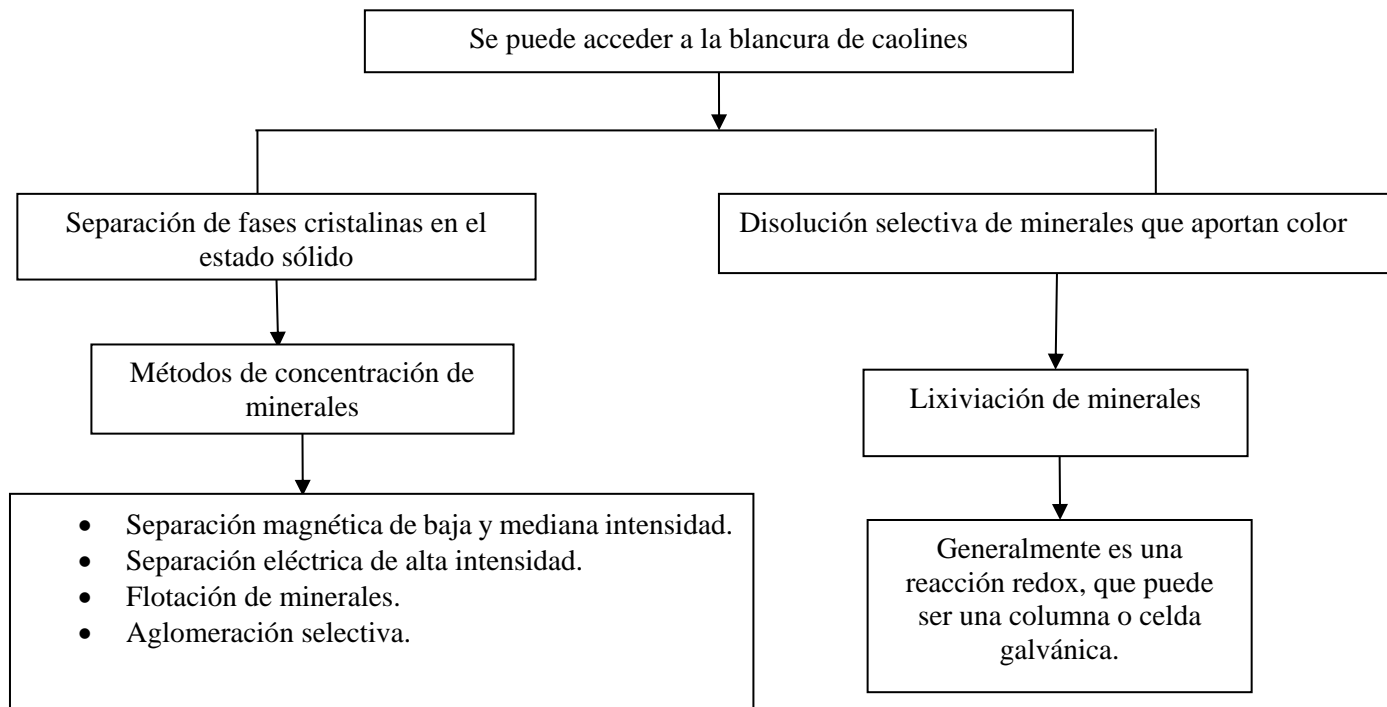


Figura 1.10 Procesos de beneficios de caolines que promueven la blancura

Fuente: (Muñoz, 2010)

1.1.17 Aglomeración en el proceso de lixiviación

La aglomeración es aplicada al proceso de lixiviación para evitar la segregación, la cual se da cuando las partículas finas pasan debajo de las gruesas. La aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación y asegurar el coeficiente de permeabilidad de la solución (Reinoso , 2021).

La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a la proporción de poros. Cuando existe entre un 10% al 20% de proporciones de materiales finos se presentan problemas con la permeabilidad, causando que en los lechos de lixiviación no haya percolación y disolución, ni extracción de valores, debido

a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación (Escalona , 2007).

Para asegurar un buen proceso de lixiviación es recomendable eliminar los finos y se puede hacer de la siguiente manera:

- Realizar un análisis granulométrico y químico del metal valioso por fracciones.
- Realizar la separación de tamaños finos y gruesos, efectuándose la lixiviación estática sólo en estos últimos, normalmente con leyes más bajas y la lixiviación dinámica con los finos, normalmente enriquecidos.
- Realizar una aglomeración, que es el procedimiento más empleado en la actualidad.

“El proceso de aglomeración consiste en la unión de las partículas finas a otras de mayor tamaño, formando un aglomerado denominado “glómero”, minimizando la presencia de partículas finas en el mineral que finalmente se envía a lixiviación, que son las que bloquean los espacios entre partículas, disminuyendo la percolabilidad de las columnas” (Reinoso , 2021).

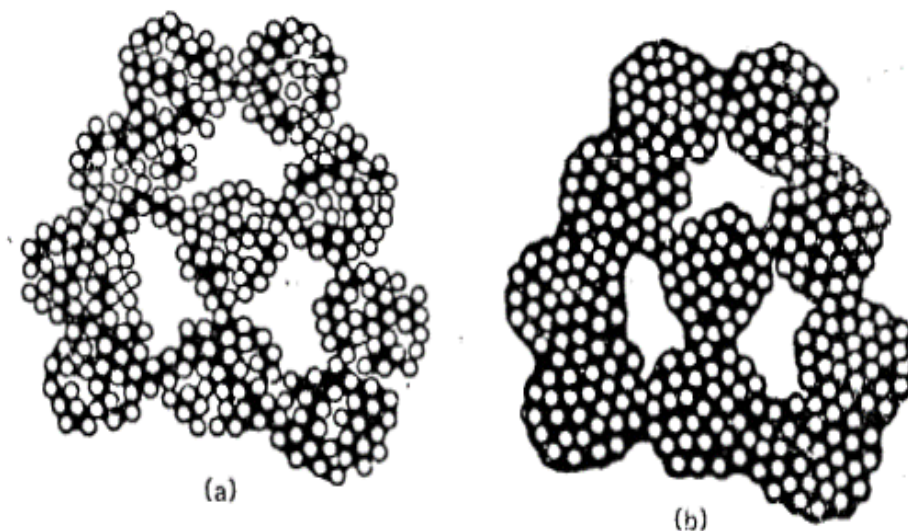


Figura 1.11 Diferentes estados de equilibrio en la formación de aglomerados

Fuente: (Reinoso,2021)

1.1.17.1 Tipos de aglomeración

1.1.17.1.1 Aglomeración por humedad

Es el proceso más simple y consiste en humedecer el material con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial, logrando que los finos se adhieran a los gruesos. Este tipo de aglomeración solo se emplea cuando existe un bajo contenido de finos.

El procedimiento más sencillo de lograr la aglomeración por humedad es el riego y se puede realizar de la siguiente manera:

- Sobre las transferencias de las cintas que transportan el mineral a la columna.
- Al caer el material de la cinta en la formación de la columna.
- Adaptando el riego a los tamaños más gruesos.
- Sobre la superficie de la columna, conforme vayan formándose los lechos o capas de mineral.

1.1.17.1.2 Aglomeración por adherentes

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas prolongando la unión de estas tanto en la manipulación como en la lixiviación.

Para realizar este tipo de aglomeración se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- El tipo y cantidad de aglomerante añadido a la alimentación seca.
- La humedad necesaria en la mezcla mineral.
- El período de curado para favorecer los puentes presentes.

1.1.17.2 Características y factores de la aglomeración

Para que este proceso sea efectivo se debe disponer de una serie de dispositivos y equipos. Además, se debe considerar las características del material como:

- El tamaño y geometría de las partículas
- Granulometría
- Características geológicas
- Ley del material
- Condiciones ambientales
- Evaporación del agua
- Humedad del curado

Se recomienda los siguientes parámetros para una buena aglomeración.

- La adición del o los aglomerantes se deben realizar sobre el mineral relativamente seco.
- La mezcla entre mineral y aglomerantes deben ser lo más compacta posible.
- Adicionar la cantidad de líquido o de solución que sea necesaria para alcanzar la humedad óptima de aglomeración.
- Se considere un cierto tiempo de reposo o curado, antes de proceder a la lixiviación (Escalona , 2007).

1.1.17.3 Aglomeradores

Son equipos destinados a la aglomeración en seco de minerales de granulometría media y fina. Estos consisten en un cilindro metálico revestido interiormente con neopreno o goma antiácida provisto de levantadores para lograr una más efectiva acción de rodado de la carga. Además, en el centro tienen las tuberías perforadas para el suministro del agua que siempre se agrega primero para humedecer el mineral (Escalona , 2007).

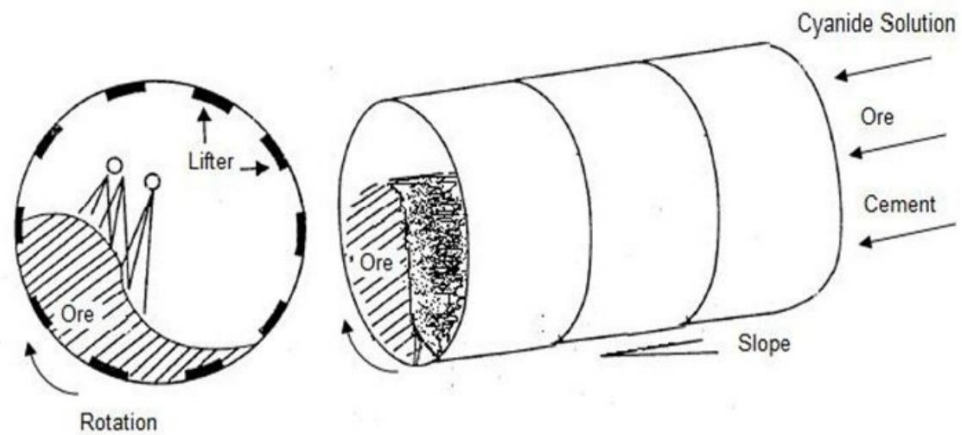


Figura 1.12 Equipo aglomerador

Fuente: (Iñiguez,2014)

1.1.18 Métodos de lixiviación

La lixiviación es un proceso químico que se usa para extraer minerales. Produce el desplazamiento de sustancias solubles o dispersables como los son la arcilla y el hierro. Durante el proceso de lixiviación, el solvente entra en contacto con la matriz sólida. Un solvente es generalmente un líquido que funciona para disolver una sustancia o soluto. El soluto es la sustancia que se disuelve por un solvente. Por lo tanto, el solvente será el líquido y el soluto sería la sustancia que desea extraer de la matriz sólida. (Flores , 2021).

Dependiendo del metal deseado y su matriz original, se pueden usar diferentes solventes también conocidos como lixiviantes que pueden ser ácidos o básicos.

Los lixiviantes varían en términos de pH, potencial REDOX o agentes quelantes, que pueden ayudar a aumentar la velocidad, o la selectividad de la disolución del metal deseado. La elección de un lixivante es importante para lixiviar la cantidad máxima del producto deseado, pero también es importante evaluar qué otros metales irán a dar dentro de la solución (Serrano, 2021).

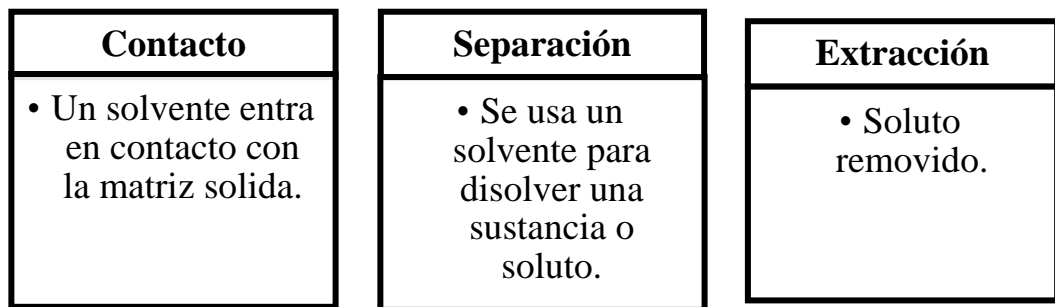


Figura 1.13 Proceso de lixiviación

Fuente: (Flores ,2021)

Para que la lixiviación tenga éxito se tienen que cumplir varios requerimientos, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo (CODELCO , 2019).

Esto depende de los siguientes factores, los que deben ser considerados en todo el proceso:

1. La localización de los minerales a disolver.
2. Volumen del material y distribución de tamaños.
3. Área expuesta.
4. Superficie específica.
5. Tamaño de partículas.
6. Porosidad.
7. Presión capilar.
8. Rugosidad o aspereza de las superficies.

1.1.18.1 Lixiviación in-situ

Este tipo de lixiviación, se extrae las sustancias valiosas sin la remoción de la roca. Es una técnica selectiva de recuperación de elementos dejando la ganga en su lugar sin originar pilas o botaderos de estéril. Durante el proceso la solución lixivante penetra el yacimiento por gravedad o a presión a través de uno o varios pozos, la solución enriquecida regresa a la superficie por otros pozos.

La lixiviación in situ requiere de un sistema operativo práctico. Es esencial adoptar un enfoque sistémico que integre todos los componentes como: una adecuada fragmentación del mineral, sistema de distribución de la solución, determinar la tasa de adición de solución y el control de su distribución, el control de pH, sistema de inyección de aire, sistema de recolección de soluciones, sistema para prevenir y monitorear las pérdidas de soluciones (Díaz, 2013).

Los beneficios de este tipo de lixiviación son:

- Se puede aplicar en yacimientos de baja ley, o de pequeño tamaño, o muy profundos.
- Menor espacio ocupado para las operaciones.
- Requiere menos energía en comparación con respecto a la minería convencional.
- Se puede reducir el consumo de agua.
- Se eliminan casi por completo las emisiones de polvo y se atenúa la contaminación por ruido.

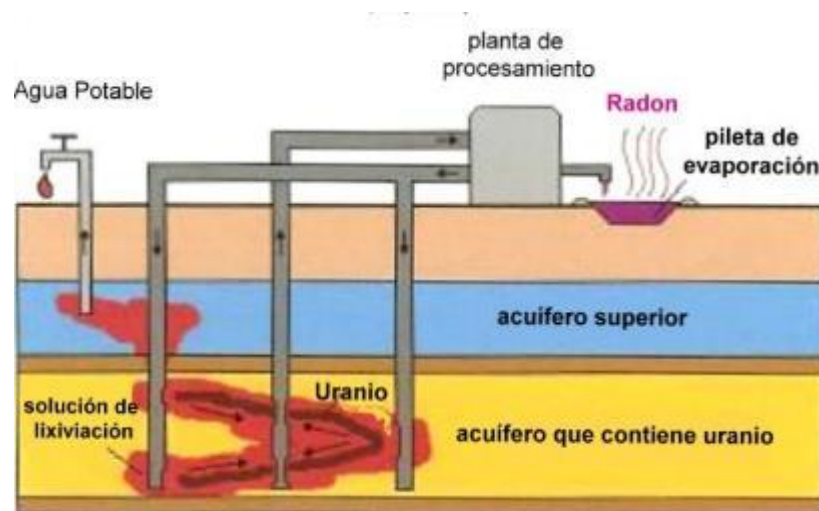


Figura 1.14 Lixiviación in-situ

Fuente: (Barreto ,2017)

1.1.18.2 Lixiviación en botaderos

Este método se utiliza para extraer minerales que tienen baja ley. El material es generalmente un lastre generado en la explotación de minas a cielo abierto, el cual es vaciado sobre una superficie poco permeable y el solvente acuoso es agregado sobre la superficie del botadero. Se percolan a través del lecho por gravedad; la solución fuerte que se obtiene por el fondo del botadero es conducida a la planta de cementación, donde se extrae el mineral y la solución remanente es retornada a la lixiviación.

La mayoría de los botaderos, son construidos en áreas de topografía favorable. La zona de botaderos ha sido seleccionada de tal modo que asegure la impermeabilidad y poder utilizar la pendiente natural de valles y quebradas, para poder recuperar y recolectar soluciones. En algunos casos en que el terreno no es suficientemente impermeable, se preparan áreas especiales similares a las de lixiviación en pilas.

Es necesario distribuir de la mejor forma posible las soluciones de lixiviación. En la mayoría de los casos se recirculan las soluciones pobres desde la etapa de recuperación del metal, agregándoles agua y ácido, para minimizar la hidrólisis y precipitación de compuestos de hierro (Vega , 2014).

1.1.18.3 Lixiviación por agitación

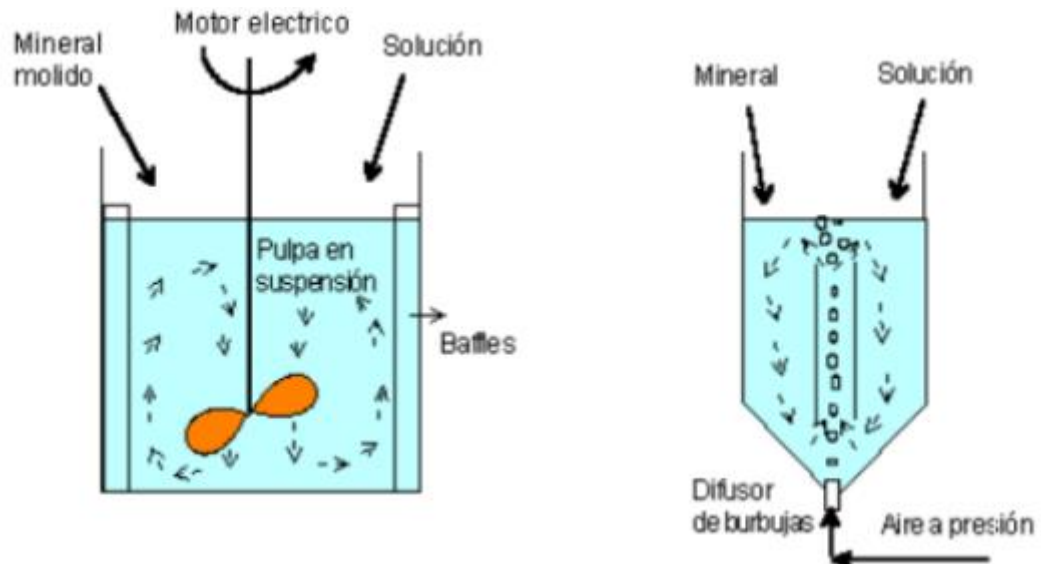
En este método de lixiviación, se agita un mineral finamente molido, lo que aumenta el área de contacto entre la superficie y la solución lixivante. Este método se utiliza con minerales de alto valor comercial, como son: oro, plata, cobre, entre otros. El objetivo de este proceso es obtener recuperaciones más altas en tiempos más cortos. Normalmente se recurre a la agitación mediante burbujeo o bien a la agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se logra la disolución completa, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas comparado con el proceso de lixiviación en pilas que requiere meses (Smaniego & Rojas , 2017)

La agitación se puede llevar a cabo mediante:

- **Agitación mecánica.** - Se da la agitación mediante rotores en el fondo del tanque, lo que permite una rotación continua.

- **Agitación neumática.** - Se realiza en tanques cilíndricos verticales con un fondo cónico, por el cual se inyecta aire comprimido.

Ambos mecanismos mantienen el mineral en suspensión hasta lograr una disolución completa. El sistema de lixiviación por agitación favorece las cinéticas de reacción, ya que aquí actúan factores como temperatura y agitación y permite el uso de reactivos



oxidantes altamente agresivos (Torres & Morales, 2018)

Figura 1.15 Lixiviación por agitación

Fuente: (Barreto ,2017)

1.1.18.4 Lixiviación por percolación

En esta técnica la solución lixivante se hace pasar a través de un lecho de mineral hacia arriba o abajo. El tiempo de contacto es mucho mayor que el de agitación, el ciclo lixivante va desde 2 días hasta los 14 días. Las extracciones metálicas que se obtiene con este método son de hasta el 80% y 90%.

Los estanques de lixiviación son construidos con concreto cubierto con mezclas de asfalto y arena.

La lixiviación por percolación se caracteriza porque se efectúa en forma de batch. Sin embargo, si se desea trabajar en contracorriente; la solución con menos ácido se utiliza para tratar minerales ricos y la solución con mayor ácido para tratar minerales con poca presencia en la roca (Misari , 2016).

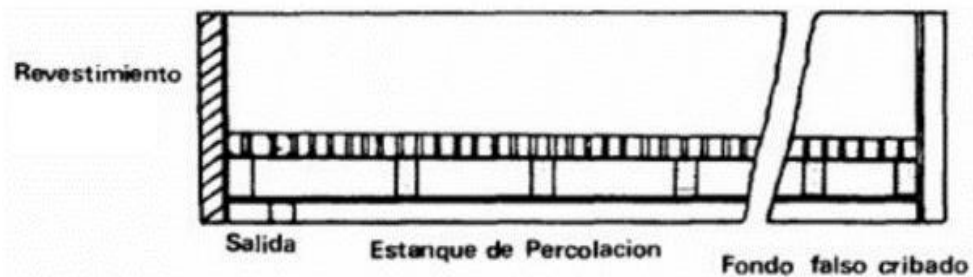


Figura 1.16 Lixiviación por percolación

Fuente: (Rosete ,2008)

1.1.18.5 Lixiviación en columnas

La lixiviación en columnas es usada en ensayos de cualquier sistema de minería por disolución, por lo general los ensayos se dan a escala de laboratorio. Este método disuelve los metales y los retira de la roca mineralizada, produciendo una solución rica. El concepto de lixiviación en columna es la mejor representación de la pila de lixiviación. Adema, este modelo es capaz de representar las mismas condiciones de tratamiento como tasa de riego y concentración de ácido. Además, entrega resultados similares al método de lixiviación por pilas (Guerra, 2006).

Este método está conformado por tubos de diferentes tamaños, diámetros y longitudes esto depende del tipo de material con el que se va a trabajar, los tubos pueden ser de PVC o acrílico, como la de la Figura 1.17. Cada una de las columnas poseen abajo de las mismas 2 platos perforados que junto con un empaque de lana de vidrio soportan el peso de la columna de material. El sistema se alimenta por la parte superior mediante una bomba peristáltica para asegurar un flujo regular y se debe diseñar con suficiente espacio para poder inundar la superficie de la columna mediante una columna de agua. (Borie , 2014).



Figura 1.17 Lixiviación por columnas

Fuente: (Vélez ,2010)

La metodología de esta lixiviación por columnas consiste en colocar la muestra de material o mineral a lixiviar en el interior del tubo con la compactación o aglomeración apropiada, y después realizar el goteo de la solución lixiviante; el caudal de solución que circula suele expresarse en litros por segundo por m^2 . Finalmente, en la parte inferior se recoge la solución concentrada en probetas, cilindros, vasijas o recipientes, en distintos períodos de tiempo (CODELCO , 2019).

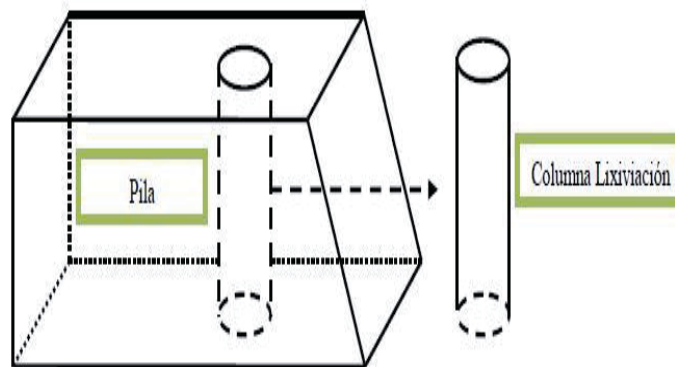


Figura 1.18 Relación pila-columna en la lixiviación

Fuente: (Olivares ,2013)

1.1.18.5.1 Principales etapas en el proceso de lixiviación por columnas

- Disolución del componente deseado presente en la fase sólida.
- Concentración y/o purificación de la solución obtenida.
- Precipitación del metal deseado o sus compuestos

1.1.18.5.2 Preparación de la columna

- Tomar medidas de columna.
- Determinar volumen de columna
- Determinar capacidad de columna.
- Calcular ácido para aglomerar.
- Aglomeración y curado del mineral (dar reposo).
- Carga de columna con mineral.

1.1.18.5.3 Preparación de la solución lixiviante

- Calcular volumen de ácido.
- Ingresar volumen.
- Enrasar.
- Agitar lentamente por unos minutos.
- Tomar la muestra para determinar la ley de ácido.

1.1.18.5.4 Parámetros del método de lixiviación por columnas

- Tamaño de partícula.** - Se tiene un amplio rango de variación, esto depende del método que se aplique. En el caso de lixiviación por columnas se maneja un chancado secundario hasta terciario.
- Aglomeración y curado.** - Esta etapa se aplica en proyectos de lixiviación en columnas y botaderos. La diferencia que existe son las variaciones de las dosis de agua y ácido dependiendo del tipo de mineral.
- Altura de lecho de mineral.** - Está determinado por la permeabilidad del mineral, la ley de cabeza, el residual de ácido en las soluciones que alcanza las capas inferiores de las columnas.
- Flujo específico de soluciones.** - La tasa de riego varía dependiendo del tipo de lixiviación, tamaño de partícula y altura de la columna.
- Ciclo de lixiviación.** - En el caso de la lixiviación en columnas puede ser de 30 a 60 días.

- f) **Consumo de ácido.** - El consumo depende del tipo de mineral y de la ganga. Los oxidados tienden a reaccionar mucho más rápido con el ácido.

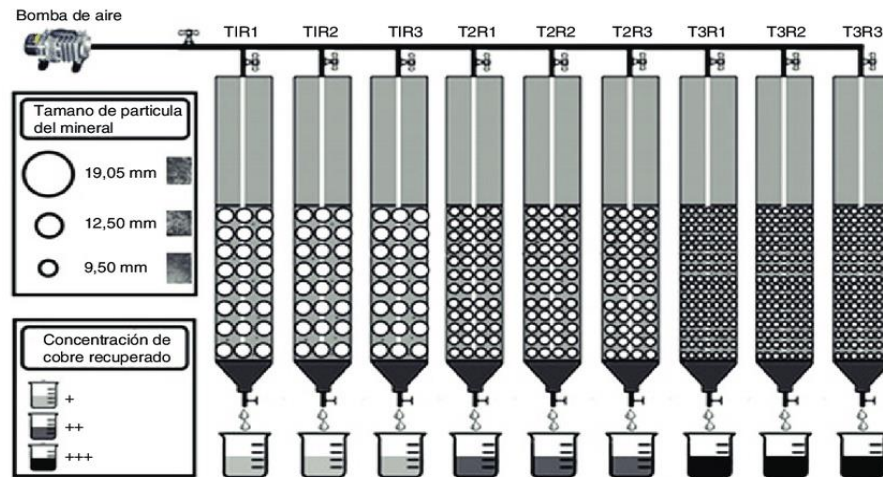


Figura 1.19 Esquema de lixiviación por columnas

Fuente: (Olivares ,2013)

| Rangos de Aplicación | Métodos Alternativos de Lixiviación | | | |
|--|-------------------------------------|---|---|--|
| | En Botaderos | En Pilas | Por Percolación | Por Agitación |
| Ley de los Minerales | Muy bajas leyes | Leyes bajas a medias | Leyes medias a altas | Leyes altas |
| Tonelaje Tratado ton/día | Grandes tonelajes | Grande a pequeño | está limitado, por instalaciones existentes | Limitado por molienda |
| Inversiones de Capital | menores | medianas | media a alta | más bien altas |
| Granulometría | ROM, como sale de la mina | Chancado hasta muy fino | Chancado medio a fino | molienda fina en húmedo |
| Recuperaciones | 40 a 60% | 70 a 85% | 70 a 85% | 80 a 95% |
| Tiempos de Trat. | de 1 a varios años | 1 a varios meses | de 1 a 2 semanas | de 6 a 24 horas |
| Calidad de Soluciones | diluidas (1 a 2 g/l) | diluidas a medias (2 a 7g/l) | concentradas (10 a 20 g/l) | medianas(5 a 15 g/l) |
| Problemas Principales en su Aplicación | recuperación incompleta | recuperación es función del tipo de mineralogía | bloqueo por finos/arcillas | molienda es cara |
| | reprecipitación Fe y Cu | requiere de grandes áreas | mayor inversión inicial | lavado o filtrado en contracorriente |
| | canalizaciones | canalizaciones | necesidad de control permanente | inversión es alta |
| | pérdidas por infiltración | evaporación puede ser alta | personal entrenado | suele requerir más agua |
| | soluciones son diluidas | | | control sofisticado: proceso es rápido |

Figura 1.20 Distintos métodos de lixiviación

Fuente: (Carita ,2014)

1.2 Fundamentos físico – químicos de los procesos hidrometalúrgicos

1.2.1 Termodinámica de sistemas acuosos

Para el estudio de la termodinámica de los sistemas acuosos se estudian los diagramas tensión – pH, conocidos como Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas de equilibrio termodinámico se basan en las reacciones que pueden presentarse en los procesos hidrometalúrgicos, mostrando la extensión de las mismas y la dependencia de variables tales como: temperatura, presión, actividad, pH de la solución y potencial.

Los diagramas de Pourbaix, aportan información valiosa de estabilidad de especies, estos diagramas permiten establecer posibles reacciones sin tener que recurrir a cálculos termodinámicos para las reacciones que tienen lugar en soluciones electrolíticas acuosas; tales como la corrosión, electrodeposición, geoquímica y química analítica. En los procesos hidrometalúrgicos, los diagramas de Pourbaix, permiten establecer las zonas y las condiciones en que es posible lixiviar los minerales o compuestos, es decir, las condiciones de estabilidad o inestabilidad termodinámica de los minerales en contacto con soluciones acuosas de una determinada composición, las propiedades de las soluciones en las que un mineral es inestable y debería descomponerse, las características de las soluciones obtenidas y las condiciones de recuperación o precipitación del elemento de interés. (Gaviria C, Restrepo O, Bustamante O, 2017)

1.2.1.1 Diagramas de Pourbaix

Los diagramas de Pourbaix representan la especie o fase más estable de un elemento en solución acuosa en función del potencial (en el eje y) y el pH (en el eje x). (Contakes, 2022)

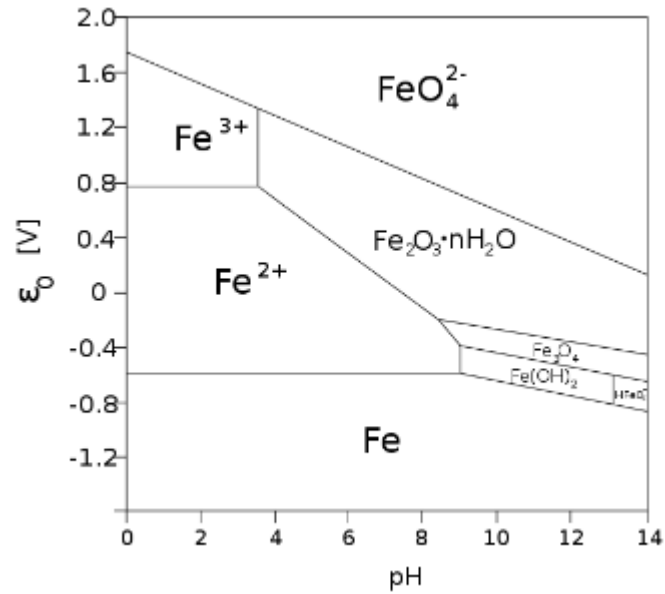


Figura 1.21 Diagrama de Pourbaix para Fe a una concentración desconocida de Fe

Fuente: (Contakes, Libretext, 2022)

1.3 Lixiviación ácida para la disolución de hierro

Favorece a las arcillas caoliníticas, ya que se usa un ácido como agente lixivante con el fin de eliminar el contenido de hierro. Se aplican técnicas de espectrometría infrarroja y de fluorescencia y difracción de rayos X durante la caracterización de la materia prima inicial y luego del proceso de lixiviación ácida.

Se consigue con este método extraer más del 98 % de las impurezas de hierro, obteniendo así un caolín de mayor pureza con contenidos de sílice de 60,48 %. Se constata que la lixiviación ácida no afecta la estructura del caolín y que constituye un valioso método de beneficio para las caolinitas pigmentadas por hierro (Villa, 2017).

La lixiviación del hierro del caolín es deseable por las siguientes razones:

- Puede utilizarse en la producción de materiales refractarios.
- Es posible recuperar elementos como níquel, cobalto, cromo y hierro.
- Puede ser aprovechada para producir alúmina por procesos como el Bayer.

1.4 Lixiviación con ácido clorhídrico

El uso del ácido clorhídrico para la lixiviación ha sido un tema de investigación en diferentes instituciones a lo largo de los años. Las impurezas, tales como el hierro y el magnesio, son los principales contribuyentes al consumo del ácido clorhídrico. En este proceso, se remueve el cloruro férrico de la solución por medio de extracción con solvente y se lo trata en una etapa de calcinación por atomización para formar hematita estable y para regenerar al ácido clorhídrico para regresarlo a la etapa de lixiviación. El ácido clorhídrico regenerado se puede reciclar dentro del proceso de lixiviación. Además, esta sustancia puede ser parte de una solución de salmuera, con un porcentaje del 10% hasta el 90% de una solución saturada de cloruro de magnesio, cloruro de zinc o cloruro metálico (Smith, 2009).

1.5 Ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico (HCl) es una disolución acuosa de cloruro de hidrógeno. Tiene color amarillo por presencia de trazas de hierro, cloro o materia orgánica, es utilizado en la refinación de minerales, en la extracción de estaño y para limpiar metales (Torres, 2016).

Para su obtención se tienen diferentes procesos industriales, entre los cuales se encuentran:

- La reacción entre cloruro de sodio o potasio con ácido sulfúrico.
- La reacción de bisulfuro de sodio con cloruro de sodio.
- El proceso Hargreaves, en el cual se usa óxido de azufre.

1.5.1 Propiedades químicas

- Reacciona con muchos metales para formar hidrógeno.
- Puede reaccionar con agentes oxidantes fuertes.
- Se utiliza como reactivo para generar muchas reacciones químicas.
- Es bastante corrosivo.

- Puede disolver metales (formando iones metálicos oxidados), tejidos orgánicos o incluso sales y minerales

1.5.2 Propiedades físicas

- Su pH es inferior a 1, es decir, es sumamente ácido.
- Su apariencia es de un líquido transparente o amarillento, dependiendo de la concentración de cloruro de hidrógeno.
- Sus propiedades físicas (como el pH específico, la densidad y sus puntos de fusión y ebullición) varían de acuerdo con su concentración en agua.

1.5.3 Usos y aplicaciones

- En la fabricación de limpiadores, solventes y otros químicos de limpieza.
- Para eliminar la incrustación de caliza (carbonato de calcio) de otros minerales.
- Para regular la acidez de otras soluciones químicas.
- Para disolver las capas de óxido de los metales en la industria metalúrgica.
- En la síntesis de otros materiales químicos como tricloruro de hierro (FeCl_3) o la síntesis de cloruros orgánico (Uriarte , 2021).

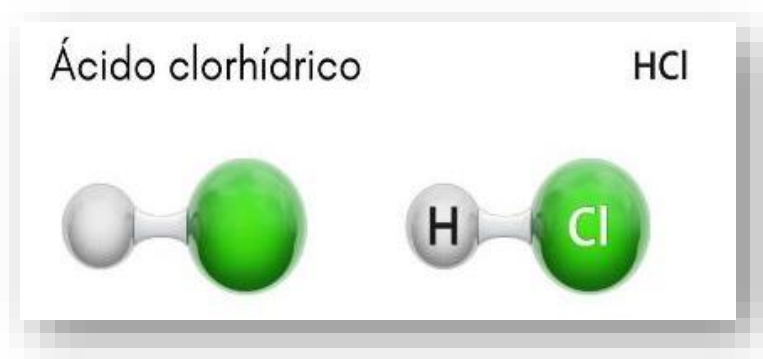


Figura 1.22 Estructura del ácido clorhídrico

Fuente: (Lifeder,2018)

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

2.1 Caracterización del caolín

Para llevar a cabo el ensayo se utilizaron muestras de caolín proveniente de la empresa Graiman, empresa dedicada a la producción y distribución de cerámica y porcelanato, cuya materia prima es: arcilla, feldespatos y caolines que son extraídos de minas ubicadas en las provincias de Zamora Chinchipe, Morona Santiago, El Oro y Azuay. En el Ecuador los caolines y arcillas caoliníferas se forman en condiciones de meteorización de rocas metamórficas ricas en aluminosilicatos como feldespatos, micas y zeolitas, los mismos que presentan baja dureza y abrasividad; los caolines se relacionan a depósitos residuales producto de la meteorización de rocas volcánicas de composición ácida.

Los caolines de alta calidad son caracterizados por bajos niveles de impurezas como hierro, titanio y minerales de tierras alcalinas para la elaboración de cerámica y porcelanato (Cornejo, 2016).

2.1.1 Área superficial específica

El área superficial específica constituye la suma del área de la superficie de todas las partículas que forman un gramo de materia, esta es denominada como área de la superficie por unidad de masa (m^2/g).

El área superficial se incrementa a medida que el número de partículas en un volumen se incrementa.

Los análisis para la determinación del área superficial fueron realizados en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, obteniéndose un valor de $34,805 m^2/g$.

2.1.2 Análisis químico mediante espectroscopía de absorción atómica

La espectrometría de absorción atómica es una técnica para determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra.

La espectrometría de absorción atómica, como su nombre indica, consiste en aplicar lo que llamamos una "fuente de radiación conocida". Si hay un elemento de la misma naturaleza que la radiación suministrada, entonces esta energía será absorbida por los átomos excitados de la muestra analizada.

Esta fuente de radiación se determina de acuerdo con el elemento químico que se desea estudiar, por lo que varía. (Baroni, 2019).

En los análisis realizados en el laboratorio de la Universidad de Cuenca se obtuvo el siguiente resultado.

Porcentaje de óxido= 1,97

2.1.3 Caracterización física del mineral

2.1.3.1 Humedad natural

- Se utilizó 500 g de mineral
- Se registró el peso del caolín húmedo
- Se dejó secar el material durante 48 horas al ambiente.
- Se tomó el peso del mineral seco

Una vez realizado los pasos anteriores, se procede a calcular la humedad natural con la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad } n(\%) = \frac{\text{masa mineral húmedo}(g) - \text{masa mineral seco}(g)}{\text{masa mineral seco } (g)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Humedad natural } (\%) = \frac{500g - 466g}{466g} \times 100 = 7.3\%$$

Se obtiene un 7.3% de humedad del caolín.

2.1.3.2 Densidad aparente

Se utilizó una muestra de 50 g, pasante malla #50

Se registró la dimensión de la probeta a utilizar; altura y diámetro.

Se depositó la muestra en la probeta

Se midió la altura libre de la probeta sobrante y la altura de la probeta cargada con el mineral

Se realizó el cálculo del volumen de la columna para luego calcular la densidad aparente.

$$Volúmen = \frac{D^2 \times \pi \times L_{total} - L_{sobrante}}{4} \quad (2)$$

$$Volúmen = \frac{3.8^2 \times \pi \times (21cm - 17)}{4} = 45.36cm^3$$

$$\rho_{ap} = \frac{masa mineral}{volúmen}$$

$$\rho_{ap} = \frac{50g}{45.36 cm^3}$$

$$\rho_{ap} = 1.102 g/cm^3$$

2.1.3.3 Densidad real

Para el cálculo de la densidad real se realizó el mismo procedimiento de la densidad aparente con la diferencia que se adiciona agua hasta llegar al límite de la probeta.

Se utilizó una muestra de 50 g.

Se registró el peso del caolín junto con la probeta dando un resultado de 131g y la medida que alcanza el mineral dentro de la probeta que fue de 50 ml.

En la probeta con caolín se colocó agua hasta el límite y se registra el peso de 152 g.

Datos obtenidos:

Masa del sólido= 50g

Masa del sólido + masa de probeta= 131g

Masa del sólido + masa de probeta+H₂O= 152g

Masa del mineral (mw) = 21g

Masa del sólido + mw= 50g+21g= 71g

Se calcula la densidad real con la siguiente fórmula:

$$\rho_{real} = \frac{\text{masa mineral}}{V_T - V_W} \quad (3)$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w}$$

$$V_w = \frac{21g}{1 \frac{g}{cm^3}}$$

$$V_w = 21cm^3$$

$$\rho_{real} = \frac{50g}{45cm^3 - 21cm^3}$$

$$\rho_{real} = \frac{50g}{45.36cm^3 - 21cm^3}$$

$$\rho_{real} = 2.05 \frac{g}{cm^3}$$

2.1.3.4 Porosidad del mineral

Para el cálculo se utilizó los resultados de la densidad aparente y densidad real.

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{\text{Densidad real} - \text{Densidad aparente}}{\text{Densidad real}} \quad (4)$$

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{2.05 \frac{g}{cm^3} - 1.102 \frac{g}{cm^3}}{2.05 \frac{g}{cm^3}} \times 100$$

$$\text{Porosidad (\%)} = 46.24\%$$

2.1.3.5 Porcentaje de material con tamaño muy fino

Esta prueba se realizó extrayendo el material fino natural contenido en el material, ya que se supone que la mayor cantidad de arcillas se encuentran en esta porción. Se utilizó una muestra de 50g de mineral seco, la colocamos sobre la malla #200 (0.074mm) y se agitó hasta que pasó todo el material fino. Luego se pesaron ambas fracciones y se obtuvo el porcentaje de material fino contenido en el material mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ fino} = \frac{\text{masa bajo \#200}}{\text{masa total}} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ fino} = \frac{10g}{50g} \times 100$$

$$\% \text{ fino} = 20\%$$

La muestra tiene un 20% de contenido de material con contenido muy fino.

2.2 Preparación de la muestra

Debido a los factores ambientales, la muestra facilitada por la empresa Graiman se encontraba húmeda por lo que se la dejó secar por algunas horas al ambiente para luego proceder a preparar la muestra.

Una vez secado el material se procedió a sacar de la muestra total, principalmente material con distintas coloraciones ya que esto era indicativo de impurezas, principalmente por la presencia de hierro. Estos óxidos e hidróxidos son los mismos que disminuyen el índice de blancura del caolín y dan como resultado arcillas de diferentes coloraciones.

El material fue llevado al molino de bolas, para así obtener una muestra con contenido más fino; para una aglomeración efectiva se separó y se tamizó partículas gruesas pasante la malla 3/8" (9.51 milímetro) ya que cuando se posee altos porcentajes de materiales finos (10-20%) se generan serios problemas en la permeabilidad del lecho, evitando la disolución y extracción de los metales de interés, debido a que el material fino aislado produce regiones en donde la filtración es reducida, generando la compactación de las columnas evitando el paso del mineral a lixiviar; es así como las consecuencias de un porcentaje alto de material fino contribuyen a disponer una mayor

cantidad de tiempo para la lixiviación, lo que eleva el consumo de reactivos, generando un material con presencia de varios contaminantes. (Ahumada, 2019)

2.3 Preparación experimental

2.3.1 Curado y aglomerado

El mineral grueso corresponde un tamaño $>$ sobre la malla #50 y $<$ a 3/8, mientras que el material fino $<$ malla #50.

Tabla 2.1 Dosificación de mineral en columnas.

| | Unidad | Columna 1 | Columna 2 | Columna 3 |
|--------------------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| Cantidad total de mineral a utilizar | g | 650 | 650 | 650 |
| Mineral fino | g | 390 | 390 | 390 |
| Mineral grueso | g | 260 | 260 | 260 |

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.1 Material fino

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.2 Material grueso

Fuente: Elaboración propia

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para el proceso de lixiviación y así asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a la proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones) finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos. Con proporciones del 10-20% de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida. La aglomeración consiste en un procedimiento que permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

La masa de los glómeros que se depositó en cada columna fue de 650 g.

- Para realizar los glómeros, el material fue previamente molido luego separado en material fino menor al tamiz #100 y en partículas gruesas menor a 3/8"

- Se utilizó ácido sulfúrico como adherentes en solución del 16%, lo que resultó una aglomeración efectiva que permitió aumentar la adhesión de partículas finas a más gruesas.
- El porcentaje total de la aglomeración estaba compuesto de 60% de mineral fino y 40% de mineral grueso.
- La aglomeración del caolín se realizó mediante movimientos rotatorios, hasta obtener una homogenización de distribución de tamaños de partículas.
- El tamaño de los glómeros se realizó desde 1 cm hasta 1.5 cm
- Finalmente se realizó el tiempo de reposo de los glómeros hasta que sequen.

2.3.2 Diseño de las columnas de lixiviación



Figura 2.3 Columnas de lixiviación

Fuente: Elaboración propia

En este proyecto se realizaron tres columnas de lixiviación con la finalidad de evaluar la remoción del hierro del caolín, mediante soluciones de ácido clorhídrico a diferentes concentraciones.

Cada columna de lixiviación se estructuró de la siguiente manera:

1. Un tubo de policarbonato transparente de 58.7 cm de largo, 0.2 cm de espesor y 8.7 cm de diámetro; cada columna se utilizó para la lixiviación del caolín y como fluido lixivante el ácido clorhídrico.
2. Tapa PVC
3. Válvula, la cual permite controlar la salida de la solución lixivante.

Dentro de la columna se colocó una malla #120 junto con grava, con la finalidad de que soporte el material y de esa manera permitir el paso solo del fluido lixivante.

2.3.2.1 Columna de lixiviación 1 (0.25 M)

Tabla 2.2 Variables de operación de la columna 1.

| Ítem | Valor | Unidad |
|----------------------|-------|--------------------|
| Masa mineral cargado | 650 | g |
| Volumen de riego | 6 | L/h-m ² |
| Concentración HCl | 0.25 | M |

Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo del ensayo se cargó cada columna con una masa de 650 g

La masa del mineral cargado se calculó, considerando el 30% de la altura total de la columna, debido a la disponibilidad del mineral. Teniendo entonces la siguiente ecuación:

Volumen de riego (9h)

$$\text{Volumen de riego} = 6 \frac{l}{h.m^2} \times 0.005945 m^2 \times 27 h \quad (6)$$

$$\text{Volumen de riego} = 0.96 l = 960 ml$$

Preparación de la solución lixiviante

Pureza del HCl = 37%

1cc= 1.186 g/ cm^3

1cc de solución original pesa 1.186 g/ cm^3

1.186g x 0.37= 0.438 g HCl

Masa molar= 36.46 g/mol

$$\frac{0.438 \text{ g HCl}}{36.46 \text{ g/mol}} = 0.012 \text{ mol HCl/cc} \quad (7)$$

Por lo tanto, la solución tiene una molaridad de 0.012 m en 1000 cc que hay en un litro.

0.012 m x 1000= 12M

37% HCl= 12 M

Se necesita 960 cc de solución de HCl a 0.25 M, por lo tanto:

960cc= 0.96 l

0.25x 0.96 l = 0.24 m de HCl en 960 de disolución.

$$\frac{0.24m}{0.012 \text{ m HCl}} = 20cc \quad (8)$$

Serían 20cc de solución original de HCl hasta completar 960 cc de disolución

960cc-20cc= 940cc

Agua= 940cc

Ácido= 20cc

2.3.2.2 Columna de lixiviación 2 (0.50 M)

Tabla 2.3 Variables de operación de la columna 2

| Ítem | Valor | Unidad |
|----------------------|-------|--------------------|
| Masa mineral cargado | 650 | g |
| Volumen de riego | 7 | L/h-m ² |
| Concentración HCl | 0.50 | M |

Fuente: Elaboración propia.

Volumen de riego (7h)

$$Volumen\ de\ riego = 8 \frac{l}{h.m^2} \times 0.005945\ m^2 \times 21\ h \quad (9)$$

$$Volumen\ de\ riego = 0.99 = 990ml$$

Preparación de la solución lixivante

Pureza del HCl = 37%

$$1cc = 1.186\ g/cm^3$$

1cc de solución original pesa 1.186 g/cm³

$$1.186g \times 0.37 = 0.438\ g\ HCl$$

Masa molar = 36.46 g/mol

$$\frac{0.438\ g\ HCl}{36.46\ g/mol} = 0.012\ mol\ HCl/cc \quad (10)$$

Por lo tanto, la solución tiene una molaridad de 0.012 m en 1000 cc que hay en un litro.

$$0.012\ m \times 1000 = 12M$$

$$37\% \ HCl = 12\ M$$

Se necesita 960cc de solución de HCl a 0.5M, por lo tanto:

$$960cc = 0.96\ l$$

$$0.5\ m \times 0.96\ l = 0.48\ m\ de\ HCl\ en\ 960\ de\ disolución.$$

$$\frac{0.48m}{0.012\ m\ HCl} = 40cc \quad (11)$$

Serían 40cc de solución original de HCl hasta completar 960 cc de disolución

$$960cc - 40cc = 920cc$$

$$Agua = 920cc$$

$$Ácido = 40cc$$

2.3.2.3 Columna de lixiviación 3 (1 M)

Tabla 2.4 Variables de operación de la columna 3

| Ítem | Valor | Unidad |
|----------------------|-------|--------------------|
| Masa mineral cargado | 650 | g |
| Volumen de riego | 7 | L/h-m ² |
| Concentración HCl | 0.50 | M |

Fuente: Elaboración propia

Volumen de riego (8h)

$$\text{Volumen de riego} = 7 \frac{\text{l}}{\text{h.m}^2} \times 0.005945 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h} \quad (12)$$

$$\text{Volumen de riego} = 0.99 = 990 \text{ ml}$$

Preparación de la solución lixivante

Pureza del HCl = 37%

1cc = 1.186 g/cm³

1cc de solución original pesa 1.186 g/cm³

1.186g x 0.37 = 0.438 g HCl

Masa molar = 36.46 g/mol

$$\frac{0.438 \text{ g HCl}}{36.46 \text{ g/mol}} = 0.012 \text{ mol HCl/cc} \quad (13)$$

Por lo tanto, la solución tiene una molaridad de 0.012 m en 1000 cc que hay en un litro.

0.012 m x 1000 = 12M

37% HCl = 12 M

Se necesita 960 cc de solución de HCl a una concentración 1M, por lo tanto:

960cc = 0.96 l

1 m x 0.96 l = 0.96 m de HCl en 960 de disolución.

$$\frac{0.96 \text{ m}}{0.012 \text{ m HCl}} = 80\text{cc} \quad (14)$$

Serían 80cc de solución original de HCl hasta completar 960cc de disolución

960cc-80cc= 880cc

Agua= 880cc

Ácido= 80cc

2.4 Finalización del proceso de lixiviación

Una vez transcurridos los 20 días los cuales fueron predeterminados previamente para el desarrollo de este proceso, se procedió a retirar el material de cada columna para secarlo, las muestras se las dejó secar al ambiente y posteriormente proceder a realizar las briquetas con las muestras de cada columna y así poder apreciar los resultados después del proceso, los mismos que se verán reflejados en el color de cada muestra.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 Análisis e interpretación

Para llevar a cabo el proceso de lixiviación, se realizó un análisis químico para saber la cantidad de hierro contenido en el caolín antes del proceso; para esto se tomó una muestra de material menor a la malla #50 (0.3mm) y se la envió al laboratorio de la Universidad de Cuenca, en donde se dio a conocer el porcentaje del hierro en la muestra de caolín.

La cantidad de contenido de hierro en el caolín antes del proceso lixiviación fue de 1.582% Fe, es decir 10.28g de Fe; después del proceso lixiviación se obtuvieron los siguientes resultados: en la columna 1 con 0.25 M un valor de 9%, 9%, 7%, 7% de lixiviación de Fe; en la columna 2 con 0.5 M un valor de 16%, 17%, 16%, 14% de lixiviación de Fe y en la columna 3 con 1 M un valor de 36%, 37%, 33% y 30% de lixiviación de Fe, valores que corresponden al día 5, 10, 15 y 20 de recolección de muestras.

3.2 Resultados experimentales

El proceso de lixiviación se realizó en tres columnas, en donde cada una de ellas se llevó a cabo con parámetros diferentes; la variable que se utilizó en este proceso fue el porcentaje de concentración de cada fluido lixivante.

El ácido clorhídrico se utilizó a una pureza del 37% y las concentraciones fueron de 0.25 M, 0.5 M y 1 M; el intervalo de recolección de muestras fue de 5 días durante 20 días.

3.2.1 Lixiviación de hierro

- El tiempo de lixiviación de cada columna fue de 20 días en total, con un volumen de 960 ml durante este periodo y diferentes concentraciones del fluido de ácido clorhídrico de: 0.25 M, 0.5 M, 1 M.

- Mediante los análisis del caolín de cada columna se determinó la cantidad de hierro que fue removido y en conjunto con el volumen de la solución lixivante se determinó el porcentaje de hierro de la solución lixivante, en los días 5, 10, 15 y 20.
- Finalizando el proceso se depositó el caolín de cada columna al horno, dejándolo secar hasta que se evapore la solución restante.

Al realizar los ensayos de laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados:

- Al quinto día del ensayo se obtuvo 967,50 de Fe en ppm con una concentración de 0.25 M; 1690 ppm de Fe con una concentración de 0.50 M y 3893,80 ppm de Fe con una concentración de 1 M.
- Al décimo día del ensayo se obtuvo 922,50 ppm de Fe con una concentración de 0.25 M; 1871,88 ppm de Fe con una concentración de 0.50 M y 4006,25 ppm de Fe con una concentración de 1 M.
- Al quinceavo día del ensayo se obtuvo 786,25 ppm de Fe con una concentración de 0.25 M; 1709,40 ppm de Fe con una concentración de 0.50 M y 3556,25 ppm de Fe con una concentración de 1 M.
- Finalmente, al veinteavo día del ensayo se obtuvo 698,75 ppm de Fe con una concentración de 0.25 M; 1553,13 ppm de Fe con una concentración de 0.50 M y 3212,50 ppm de Fe con una concentración de 1 M.

A continuación, en la tabla 3.1 se muestran los valores de los ensayos correspondientes a cada columna.

Tabla 3.1 Lixiviación del hierro en cada columna

| Tiempo | Columna 1 (0.25 M) | Columna 2 (0.5 M) | Columna 3 (1 M) |
|---------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Días | Fe (ppm) | Fe (ppm) | Fe (ppm) |
| 5 | 967.50 | 1690.63 | 3893.80 |
| 10 | 922.50 | 1871.88 | 4006.25 |
| 15 | 786.25 | 1709.40 | 3556.25 |
| 20 | 698.75 | 1553.13 | 3212.50 |

Fuente: Elaboración propia

En conjunto con datos como: cantidad de fluido lixiviante, masa de la muestra depositada en las columnas, contenido de hierro antes del proceso y cantidad de hierro recuperado después de la lixiviación; se obtiene el porcentaje de hierro lixiviado en el en el lapso de 20 días.

Tabla 3.2 Porcentaje de hierro removido

| Tiempo | Columna 1 (0.25M) | Columna 2 (0.5 M) | Columna 3 (1 M) |
|--------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Días | % | % | % |
| 5 | 9 | 16 | 36 |
| 10 | 9 | 17 | 37 |
| 15 | 7 | 16 | 33 |
| 20 | 7 | 14 | 30 |

Fuente: Elaboración propia.

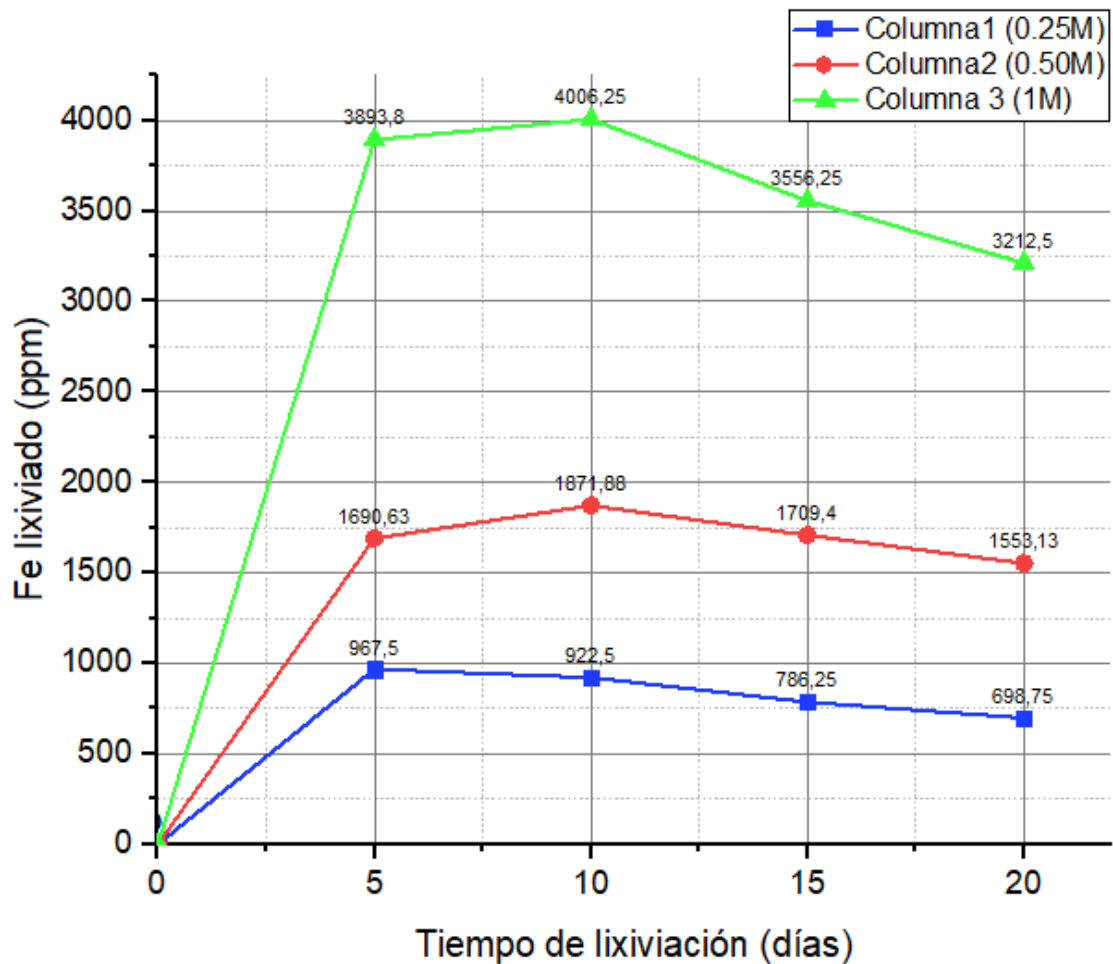


Figura 3.1 Cantidad de hierro lixiviado vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

La columna 1 fue la que presentó el menor valor de hierro removido, ya que esta se desarrolló con la concentración de ácido clorhídrico más baja de 0.25 M. La segunda columna se llevó a cabo con una concentración de 0.5 M y presentó un valor de remoción mayor que la primera. La tercera columna se realizó con la mayor concentración de ácido clorhídrico de 1 M, así mismo presentó el valor más alto de remoción de hierro.

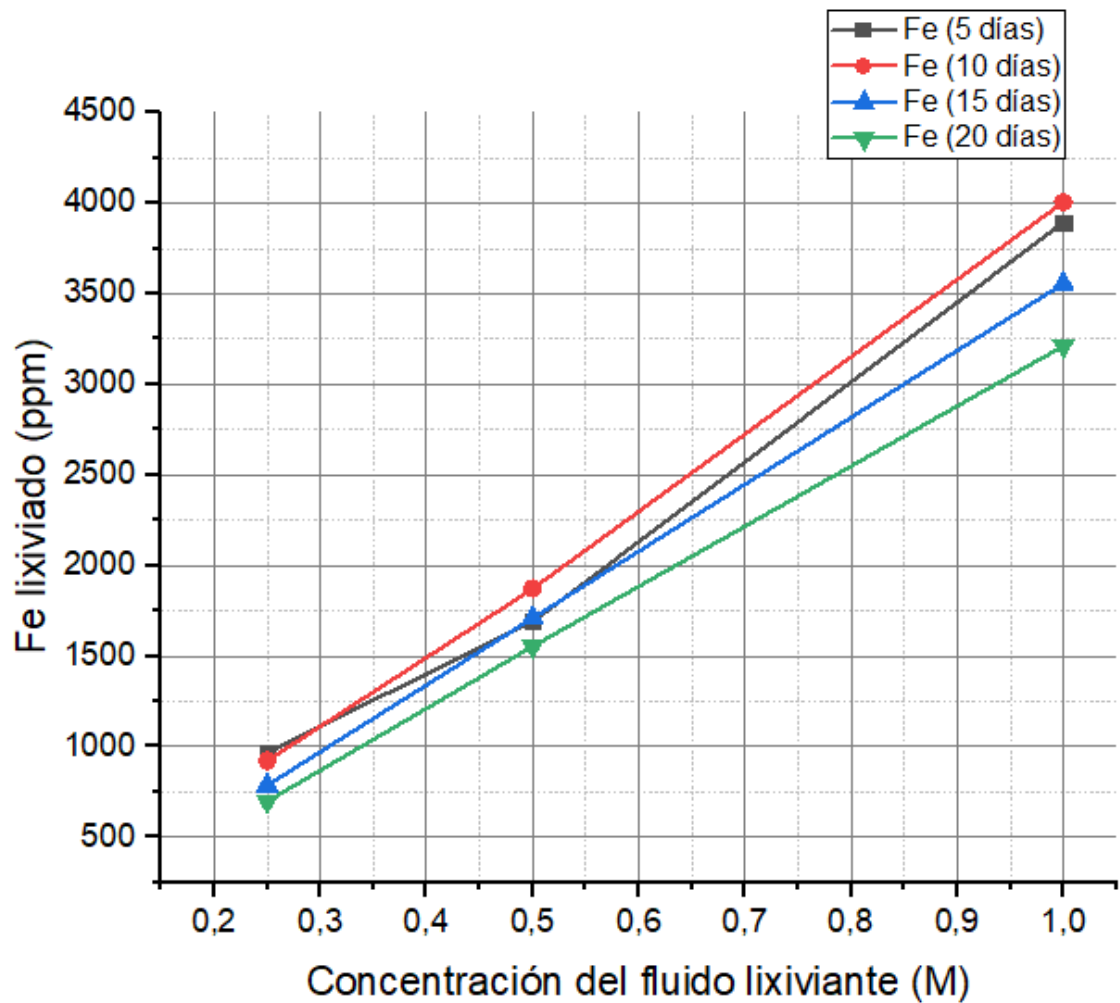


Figura 3.2 Hierro lixiviado vs concentración.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Modelo cinético para la remoción de hierro

A continuación, se presentan los gráficos con los resultados de la línea de tendencia exponencial para cada columna, con el propósito de verificar el comportamiento de remoción de hierro respecto al tiempo.

Columna 1 (0.25 M)

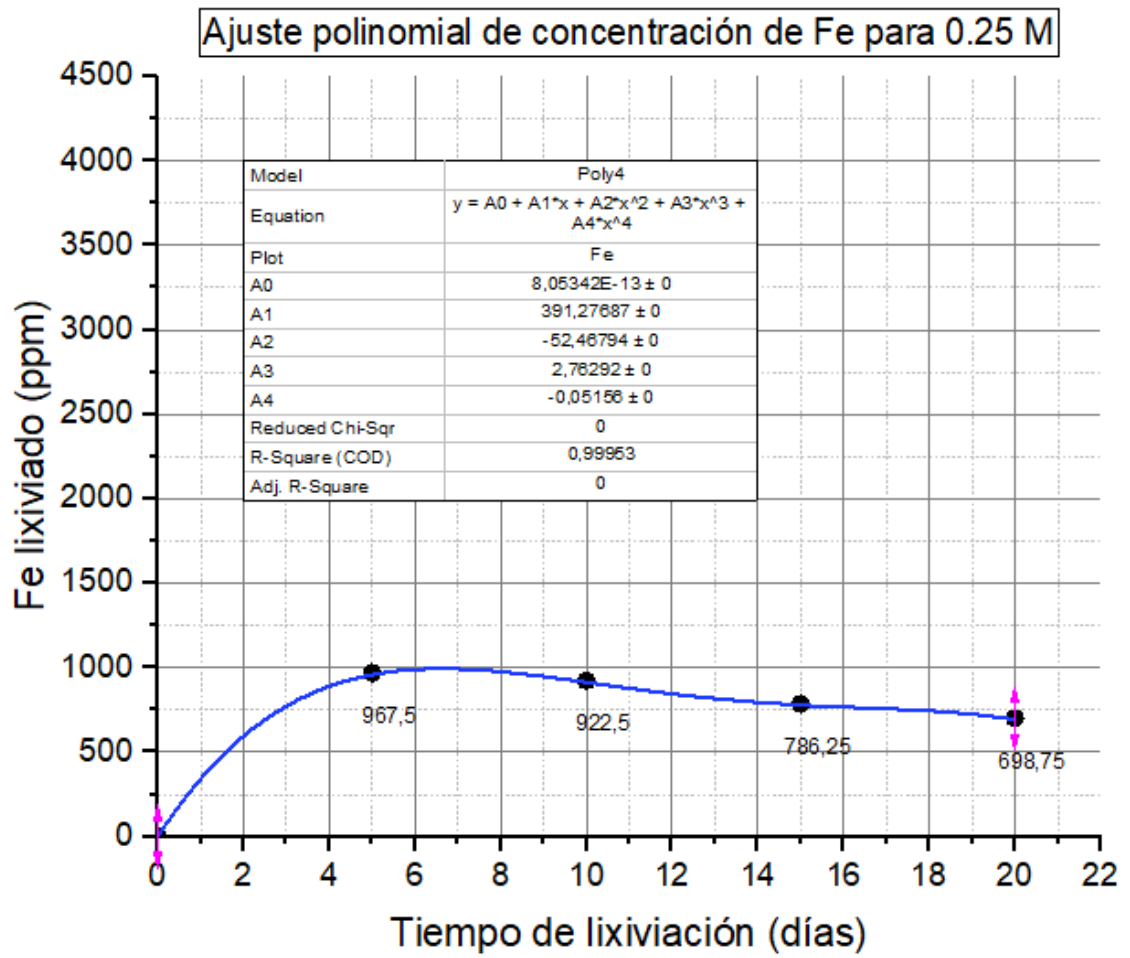


Figura 3.3 Modelo cinético para la columna 1 de Fe removido vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

Columna 2 (0.5 M)

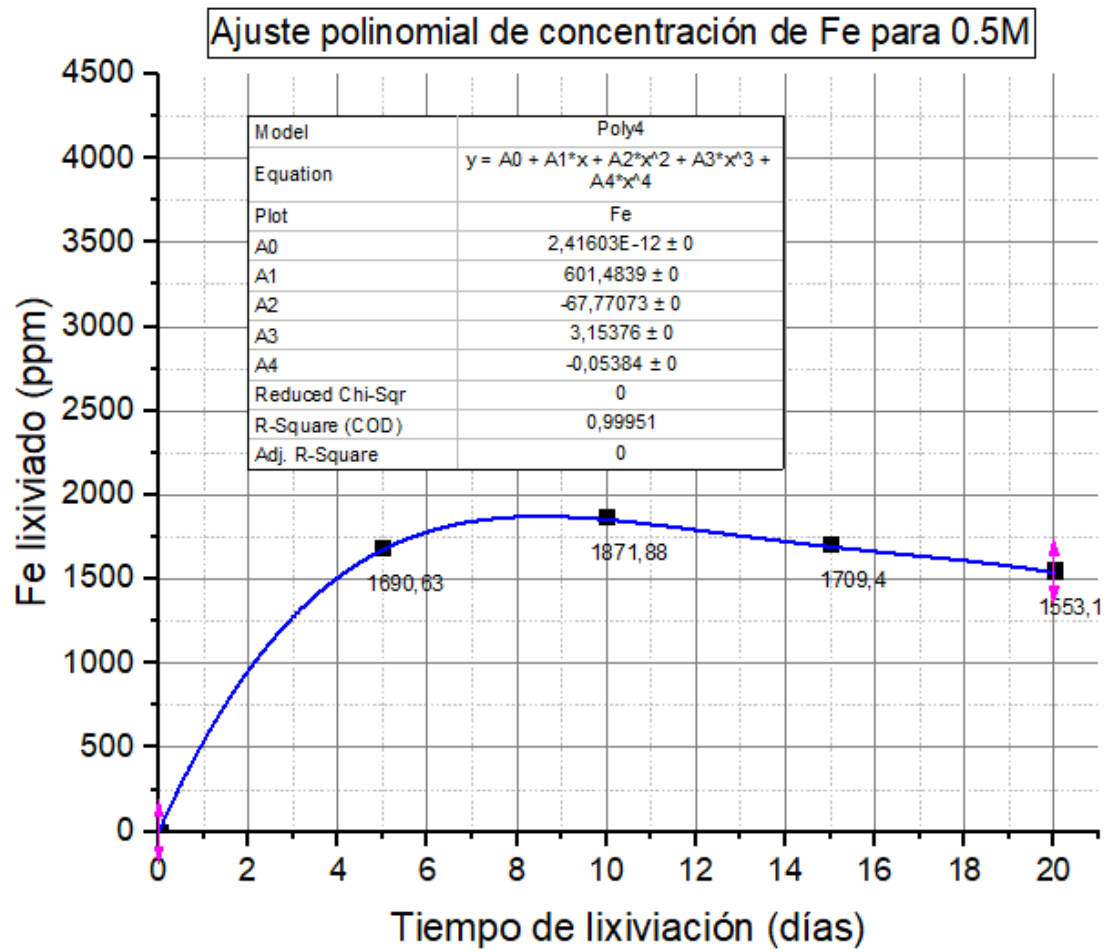


Figura 3.4 Modelo cinético para la columna 2 de Fe removido vs tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Columna 3 (1 M)

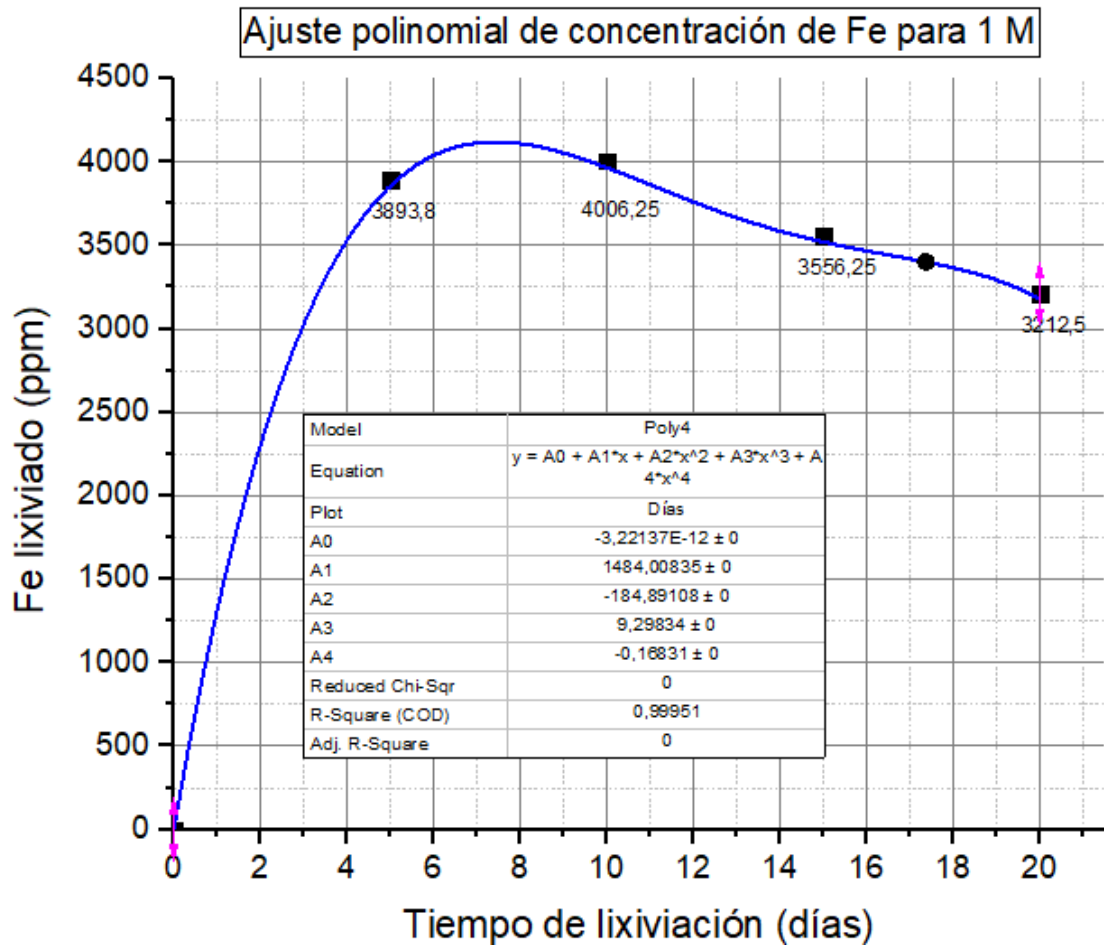


Figura 3.5 Modelo cinético para la columna 3 de Fe removido vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

3.3 Discusión de los resultados

Este proyecto tuvo como objetivo realizar la lixiviación del caolín mediante columnas utilizando ácido clorhídrico a escala de laboratorio, con la finalidad de remover las impurezas de Fe contenidas en el caolín. Para este proceso se reconoció las características físicas del caolín y se fue variando la lixiviación mediante diferentes soluciones de concentraciones de ácido clorhídrico para conocer la eficiencia con esta variable.

Las características físicas del caolín es lo más importante antes de la ejecución de la lixiviación; ya que permite conocer sus propiedades físicas como: la humedad natural

y el porcentaje de arcillas con tamaños muy finos, alcanzando una mejor lixiviación del mineral y permeabilidad, cuando se consigue eliminar el hierro presente en el caolín.

Al finalizar la experimentación del proceso, se obtuvieron los resultados del contenido de hierro, en relación con los resultados iniciales provenientes de la absorción atómica de las muestras.

La obtención de los valores de concentración de hierro se dio mediante la recolección de 30 ml de solución de las columnas 1,2 y 3; cada cinco días, durante 20 días.

Durante los resultados de la experimentación se analizó una variable para cada columna que fue la concentración del ácido clorhídrico, con la misma cantidad de masa del material, el mismo volumen de lixivante y un tiempo constante para las tres columnas.

En la columna de lixiviación 1, con un volumen de 960ml a una concentración de ácido clorhídrico de 0.25 M, dio como resultado la menor remoción del contenido de hierro, debido a que no se logró una percolación adecuada aún con la aglomeración del mineral, esto debido al volumen de ácido utilizado.

En la columna 2, con un volumen de 960 ml a una concentración de ácido clorhídrico de 1 M, dio como resultado la mayor remoción de contenido de hierro en el caolín, aunque la columna no tuvo una buena percolación.

Finalmente, en la columna 3, con un volumen igual a los anteriores y una concentración de 0.50 M se obtuvo una remoción mayor que la columna 1 y menor que la columna dando valores intermedios.

De los ensayos realizados la remoción de hierro con la respectiva concentración y tiempo se presentaron los siguientes valores:

Tabla 3.3 Remoción de hierro al día 5.

| DÍA 5 | |
|--------------------------|-----------------|
| Concentración (M) | Fe (ppm) |
| 0.25 | 967,5 |
| 0.5 | 1690,63 |
| 1 | 3893,8 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Remoción de hierro al día 10

| DÍA 10 | |
|--------------------------|-----------------|
| Concentración (M) | Fe (ppm) |
| 0.25 | 922,5 |
| 0.5 | 1871,88 |
| 1 | 4006,25 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5 Remoción de hierro al día 15.

| DÍA 15 | |
|--------------------------|-----------------|
| Concentración (M) | Fe (ppm) |
| 0.25 | 786,25 |
| 0.5 | 1709,4 |
| 1 | 3556,25 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Remoción de hierro al día 20.

| DÍA 20 | |
|--------------------------|-----------------|
| Concentración (M) | Fe (ppm) |
| 0.25 | 698,75 |
| 0.5 | 1553,13 |
| 1 | 3212,5 |

Fuente: Elaboración propia

El contenido inicial del hierro en el caolín antes del proceso fue de 1.582 ppm, al verificar los resultados al final del proceso se obtuvo la remoción más alta de hierro en el día 10 con una concentración del ácido clorhídrico de 1 M con los siguientes resultados: al día 5 se obtuvo una remoción del 36%, al día 10 una remoción del 37%, al día 15 una remoción del 33% y al día 20 una remoción del 30%.

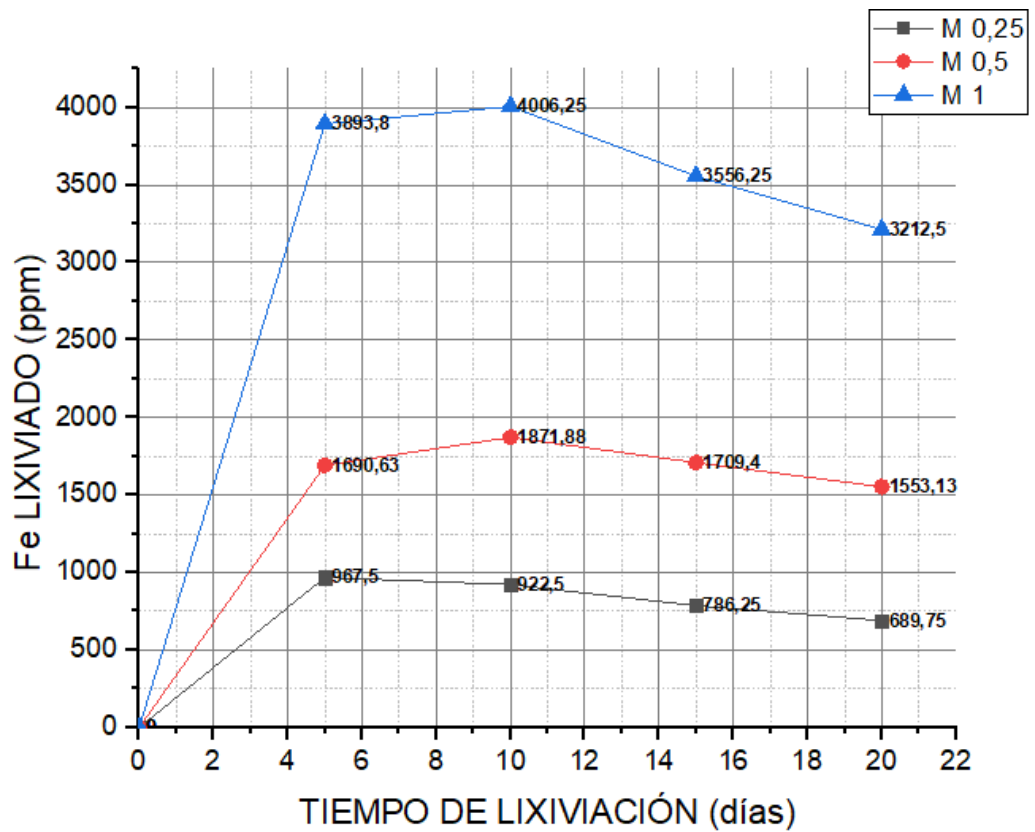


Figura 3.6 Hierro removido vs tiempo de lixiviación

Fuente: Elaboración propia

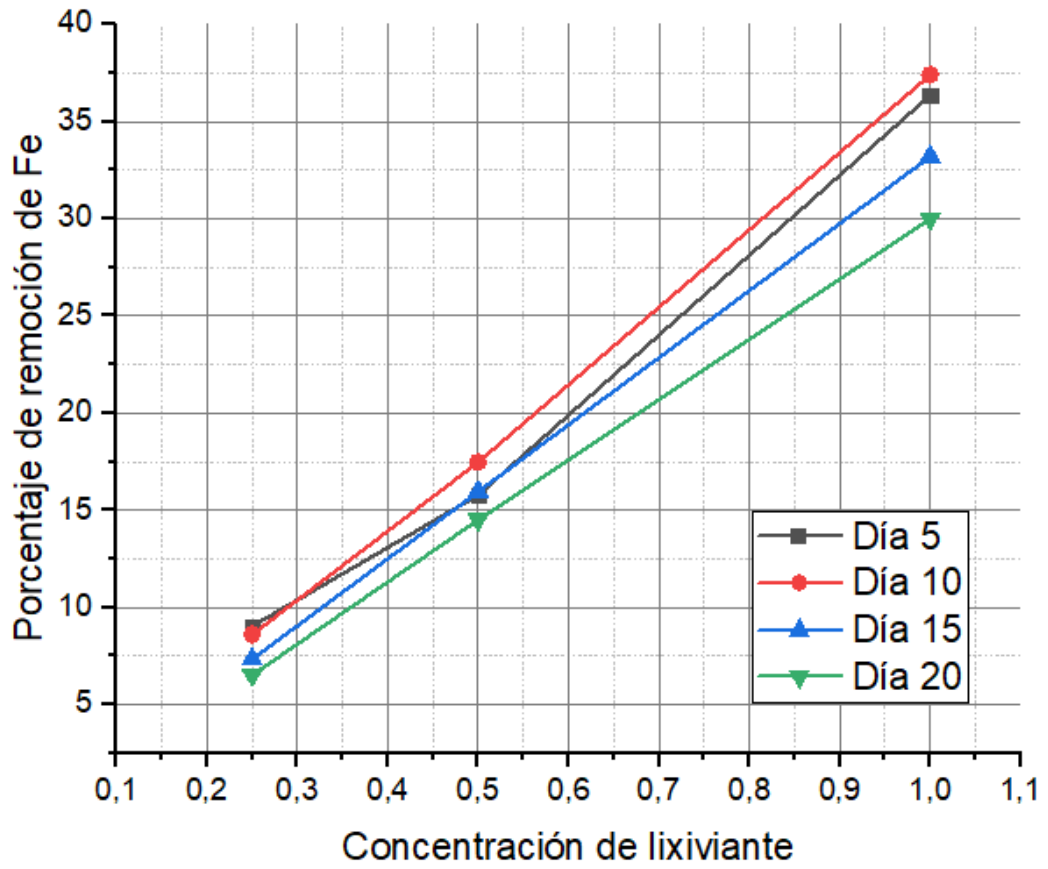


Figura 3.7 Porcentaje de remoción vs concentración del ácido clorhídrico.

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Con los ensayos realizados se logró obtener remoción del hierro sobre la superficie del mineral utilizando diferentes concentraciones de fluido lixivante a diferentes periodos de tiempo. Por ejemplo, en el día 10, se obtuvieron remociones del 9%, 17% y 37% para concentraciones de ácido clorhídrico de 0.25 M, 0.5 M y 1 M. Obteniendo el mejor resultado en la columna 3, la cual constaba con una concentración de 1 M de ácido clorhídrico.
- Debido al alto contenido de arcillas en el caolín, se requirió la aglomeración del mineral, ya que por lo contrario se daría el arrastre de las partículas en la superficie del caolín lo que provocaría zonas de impermeabilidad y una solución lixiviada contaminada por partículas finas. Determinando que es posible la lixiviación en columnas con ácido clorhídrico, pero debido a la inundación de la sustancia lixivante se produce el desmoronamiento de glómeros de caolín.
- En la figura 3.6 se observó que la mayor remoción de hierro se dio utilizando una concentración de ácido clorhídrico de 1 M como muestra la línea azul, posterior al día 10 y luego va descendiendo debido al volumen del lixivante y concentración utilizada, ya que en la columna 3 hubo una disgregación de los aglomerados de caolín más rápida que en las otras dos columnas.
- En todas las columnas existió disgregación del aglomerado al día 10 y fue proporcional a la concentración de la sustancia lixivante; es decir, cuanto mayor concentración mayor disgregación, aun así, la columna 1 y 2 no mostraron aumento en la remoción después del día 10.
- Mediante los análisis se observó que a partir de una determinada concentración de lixivante, se alcanza el equilibrio dinámico; en el caso del ensayo realizado a los 10 días se encuentra un punto de remoción de Fe, el cual ha alcanzado el

equilibrio dinámico de la reacción, a partir de este punto ya no es posible generar mayor remoción de hierro.

- El gráfico 3.7 muestra el comportamiento de la variación de concentración de la remoción de hierro en ppm, para diferentes concentraciones de la molaridad y diferentes condiciones de tiempo. La curva roja, la cual fue analizada a los 10 días muestra que conforme aumenta la molaridad, a los 10 días se consigue la máxima remoción de hierro.
- En el gráfico 3.7 la línea roja por encima de las líneas negra, azul y verde; indica que a mayor concentración del fluido lixivante, se genera mayor remoción de hierro, lo que concuerda con la teoría de la cinética de reacciones químicas que indica que las constantes de velocidad de las reacciones químicas dependen directamente de las concentraciones de los reactivos.
- Se observó que al quinto día no hubo una variación significativa con respecto al día 10, se vio también que para los 15 y 20 días la remoción de hierro descende, ya que se presentó un fenómeno inverso con los glómeros de caolín, el cual pudo haber sido influenciado por la inundación de la sustancia lixivante que se utilizó.
- De acuerdo a los análisis realizados, la máxima remoción de hierro se dio a los 10 días, ya que a partir de este tiempo los glómeros se desmoronaron por lo que generó una obstrucción del fluido lixivante; es por esto que al día 10 la recuperación descendió debido al fenómeno inverso de la decantación, es decir el hierro que estaba líquido volvió al estado sólido, situación que interfirió en el proceso.
- Los gráficos demuestran que existe una reacción química reversible, es decir, la reacción procede hacia la formación de productos; tan pronto como se forman moléculas de productos, empieza el proceso inverso, es decir, estas moléculas reaccionan y forman moléculas de reactivo.

- Debido a que el caolín tiene un alto porcentaje de arcillas, requiere la etapa de aglomeración del mineral, ya que existiría un arrastre de partículas finas en la superficie del caolín que formaría, zonas de impermeabilidad del mineral y una solución lixiviada contaminada con partículas finas (Barros-Daza & Bustamante-Baena, 2015). Esto determina que es posible la lixiviación en columnas con ácido oxálico con un contenido muy alto de arcillas, pero debido al contenido de partículas muy finas de arcillas que contiene el caolín, se produjo un concentrado en la solución lixiviada, originando un estado coloidal de la solución debido a la reacción con el ácido oxálico.

Recomendaciones

- Realizar los análisis de laboratorio durante los 5 primeros días de manera consecutiva, para poder realizar una curva del comportamiento cinético de manera constante en los primeros días.
- Se requiere antes del proceso de lixiviación hacer un estudio teórico detallado del ácido clorhídrico a utilizar, así se conocerá el comportamiento y propiedades del fluido lixivante y de esta manera se podrán evitar ciertas alteraciones en el proceso de lixiviación en columnas.
- Realizar pruebas y ensayos del caolín, como: permeabilidad, contenido de humedad y porcentaje de arcilla, ya que estas propiedades son fundamentales en la lixiviación y así evitar el estancamiento de la solución concentrada en el mineral, lo que permite lograr una percolación adecuada de la solución lixivante.
- Una de las principales características distintivas de la lixiviación en columna, es el pretratamiento de los minerales, es por eso, que se hace necesaria realizar una adecuada aglomeración del caolín con adherentes y equipos aglomeradores, ya que la aglomeración de los finos en torno a las partículas mayores con agua y ácido sulfúrico concentrado permite elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho de mineral con el fin de alcanzar alturas de pilas adecuadas, mejorar los índices de recuperación y acortar los ciclos de lixiviación. (Escalona L. M., 2007)
- Variar los tamaños de los glómeros de caolín para ver si mejora el comportamiento del mismo al entrar en contacto con el ácido clorhídrico.
- El proceso de lixiviación se debe realizar con ácido clorhídrico mediante irrigación por goteo, ya que por inundación los glómeros de caolín tienden a disgregarse rápidamente dificultando la percolación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada, A. (2019). PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACIÓN EN MINERALES OXIDADOS CON .
- Alonso , J. (2010). Propiedades físicas: densidad y porosidad. *University of Oviedo*, 1-3. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237009661_PROPIEDADES_FISICAS_DENSIDAD_Y_POROSIDAD
- Barlomé, C. (1996). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones . *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio* , 14.
- Baroni. (29 de agosto de 2019). Espectrometría de absorción atómica y espectrometría de emisión atómica.
- Borie , C. (2014). Columnas de Lixiviación, una excelente herramienta para evaluar la movilidad de los contaminantes provenientes de botaderos y suelos afectados por la actividad minera. *AGQ*, 5. Obtenido de <https://agqlabs.cl/wp-content/uploads/Columnas-de-lixiviacion-y-contaminantes-provenientes-de-la-actividad-minera.pdf>
- Bustamante , M. (2014). *Blanqueo de caolín por medio de lixiviación de pilas con ácido oxálico* . Obtenido de Universidad Nacional de Colombia : https://www.academia.edu/38431420/Blanqueo_de_caol%C3%ADn_por_medio_de_lixiviaci%C3%B3n_en_pilas_con_%C3%A1cido_ox%C3%A1lico
- Cabrera, R. (2011). *Capítulo 4. Materiales cerámicos*. Obtenido de Slideshare.net: <https://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-4-materiales-cermicos>
- Carita , L. (2014). Pruebas de lixiviación en columna de mineral oxidado. [*Teisis de grado, Universidad Nacional Jorge Basadre*]. *Repositorio UNJBG*. Universidad Nacional Jorge Basadre. Obtenido de http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2440/358_2014_laura_carita_kc_fain_ingenieria_metalurgia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CODELCO . (2019). *Lixiviación* . Obtenido de codelcoeduca: https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf
- Coluccio, E. (2021). *Conductividad térmica*. Obtenido de Concepto : <https://concepto.de/conductividad-termica/>

- Cordinación general de minería. (2014). *Perfil del mercado del caolín*. Obtenido de economia.gob.mx:
https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_caolin_2014.pdf
- Cornejo, P. (Agosto de 2016). Depósitos minerales no metálicos del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Díaz, A. (2013). Proposición de un sistema de lixiviación In situ. [*Tesis de grado, Universidad de Chile*]. Unversidad de Chile. Repositorio de la Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114460/Proposicio%CC%81n-de-un-sistema-de-lixiviacio%CC%81n-in-situ.pdf?sequence=4#:~:text=La%20lixiviaci%C3%B3n%20in%20situ%20corresponde,la%20remoci%C3%B3n%20de%20la%20roca.>
- Escalona , L. (2007). *Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales*. Obtenido de metsolver: <http://www.metsolver.com/Papers/dt3.pdf>
- Flores , M. (2021). *Lixiviación*. Obtenido de [mineriaenlinea.com](https://mineriaenlinea.com/glosario/lixiviacion/):
<https://mineriaenlinea.com/glosario/lixiviacion/>
- Garzón , M. (2018). *Materiales cerámicos*. Obtenido de [Areatecnologia](https://www.areatecnologia.com/materiales/materiales-ceramicos.html):
<https://www.areatecnologia.com/materiales/materiales-ceramicos.html>
- Guerra, G. (2006). *Lixiviación en columnas* . Obtenido de Slideshare.
- Hernández , V., & Sanchez , M. (1981). *Los materiales arcillosos: composición, pr.*
- Landín, P. (2013). *Materiales cerámicos: propiedades, clasificación y obtención*. Obtenido de [Blogspot.com](http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/materiales-ceramicos-propiedades.html):
<http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/materiales-ceramicos-propiedades.html>
- Maldonado. (2019). *Cerámicos*. Obtenido de <http://blog.pucp.edu.pe/blog/qm2-202-131/wp-content/uploads/sites/627/2019/11/CERAMICOS-GRUPO-2.pdf>
- Maldonado. (2021). *Materiales cerámicos: Ejemplos, propiedades y aplicaciones*. Obtenido de [Geologiaweb](https://geologiaweb.com/materiales/materiales-ceramicos/): <https://geologiaweb.com/materiales/materiales-ceramicos/>
- Misari , R. (2016). *Biolixiviación*. Perú: Organismo superior de la Inversión y Energía y Minería. Obtenido de <https://issuu.com/osinergmin/docs/biolixiviacion/146#:~:text=LIXIVIACI%C>

3%93N%20POR%20PERCOLACI%C3%93N%20E1%20t%C3%A9rmino,por%20lo%20general%2C%20el%20primero.

- Molina. (2005). *Caolín y arcillas caoliníticas*. Obtenido de igme.es: https://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2005_06/CAOLIN%20Y%20ARC%20CAOL2005.pdf
- Molina. (2019). *Los cerámicos y sus propiedades*. Obtenido de Utn.edu.ar: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/62_materiales_cermicos.html
- Morillas , J. (2008). *Propiedades térmicas de los materiales cerámicos*. Obtenido de upcommons.upc.edu: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81325/ANEJOS_PFC_280815_JOSE_MORILLAS.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Muñoz, A. (2010). Blanqueo de caolines de la unión Antioquia usando métodos hidroelectrometalúrgicos. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7332/1040731113.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Narváez, D. (2008). *Los tipos de arcillas caoliníferas*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/>: <https://www.quiminet.com/articulos/los-tipos-de-arcillas-caoliniferas-20657.htm>
- Navarro, J. (2014). *Propiedades de los materiales cerámicos* . Obtenido de es.calameo: <https://es.calameo.com/eya-academy/read/003506270f407627e9804>
- Peña, R. (2015). *Punto de fusión y de ebullición* . Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira: <https://academia.utp.edu.co/quimica1/files/2016/05/Temperaturas-de-fusi%C3%B3n-y-de-ebullici%C3%B3n.pdf>
- Ramírez , P. (2009). *Determinación del rango o temperatura de fusión*. Obtenido de anmat.gov.ar: http://www.anmat.gov.ar/webanmat/mercotur/ACTA02-13/Anexo_02_Determinaci%F3n_del_punto_de_fusi%F3n_ver_13.pdf
- Reinoso , J. (2021). *Aglomeradores*. Obtenido de eralchile: <https://www.eralchile.com/equipo/aglomeradores>

- Reyes, E. (2012). *Purificación de arcillas de caolín mediante técnicas electroquímicas*. Obtenido de uaeh.edu.mx: <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6114/cap26.pdf>
- Rocha, E. (2005). *Introducción a los materiales cerámicos*. Obtenido de Azc.uam.mx: <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/4570>
- Sánchez , M. (2020). *Perfil del mercado del caolín*. Obtenido de gob.mx: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564111/Caol_n_2020__EN_E_.pdf
- Serrano, J. (2021). *Lixiviación en metalurgia y en la recuperación de metales*. Obtenido de emew: <https://emew.com/es/lixiviacion-en-metalurgia-y-en-la-recuperacion-de-metales/>
- Smaniego , I., & Rojas , A. (2017). Influencia de la granulometría del mineral y temperatura de calcinación en el porcentaje de extracción de Au mediante cianuración por agitación de un mineral carbonáceo aurífero procedente de Pallasca – Ancash. [*Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo*]. Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de Repositorio de la Universidad Nacional de Trujillo. <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9395/Brito%20Samaniego%20C%20Ider%20Rondero%20Rojas%20Alex%20Eladio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Smith. (1998). En W. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (págs. 513-514). Concepción Fernández Madrid.
- Smith. (2009). Proceso de lixiviación en presencia de ácido clorhídrico para la recuperación de un metal valioso a partir de un mineral. *Española de Patentes y Marcas*, 1-50. Obtenido de <https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/3b/fc/f537d42b441e4c/ES2329922T3.pdf>
- Steelceram. (2009). *Características de los materiales cerámicos*. Obtenido de Steelceram: <https://www.steelceram.com/caracteristicas-de-los-materiales-ceramicos/>
- Torres , L., & Morales, A. (2018). Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvanico. *Revista Semilleros: Formación Investigativa*, 4(1), 1-12. Obtenido de

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7739/1/6122928-2018-1-IQ.pdf>

Torres. (2016). *Hoja de seguridad del ácido Clorhídrico*. Obtenido de [quimica.unam.mx: https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/3hshcl.pdf](https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/3hshcl.pdf)

Universidad Tecnológica Nacional . (2020). *Propiedades magnéticas de la materia* . Obtenido de [frro.utn.edu.a: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/\(8\)%20PROPIEDADES%20MAGN%C3%89TICAS%20DE%20LA%20MATERIA.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/(8)%20PROPIEDADES%20MAGN%C3%89TICAS%20DE%20LA%20MATERIA.pdf)

Uriarte , J. (2021). *Ácido clorhídrico*. Obtenido de [Caracteristicas.co: https://www.caracteristicas.co/acido-clorhidrico/](https://www.caracteristicas.co/acido-clorhidrico/)

Vanegas, P., & Hernández , P. (2014). El caolín y sus aplicaciones industriales . *Revista Hidalgo* .

Vega , J. (2014). *Lixiviación en botaderos* . Obtenido de [Scribd: https://es.scribd.com/presentation/241382055/Lixiviacion-en-Botaderos](https://es.scribd.com/presentation/241382055/Lixiviacion-en-Botaderos)


Vergara , G. (2019). *Enriquecimiento de alúmina presente en un caolín de la parroquia El Tablón, San Antonio de Cumbe, cantón Saraguro*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9425/1/15062.pdf>

Villa, S. (2017). Lixiviación ácida inversa en la eliminación de hierro de la arcilla caolinítica de Cayo Guam, Moa, Cuba. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 1-13. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v33n2/mg05217.pdf>

ANEXOS

Caracterización del caolín.

Anexo 1 Análisis del área superficial del caolín

| | | | |
|---|---|--|--|
|  Proyecto Producción de Hidrógeno UNIVERSIDAD DE CUENCA | | INFORME DE RESULTADOS DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL BET DE MUESTRA DE CAOLIN | |
| Fecha de análisis de la muestra 14-12-2021 | Fecha de entrega del informe: 22-12-2021 | Responsable: Ing. Lourdes Jara C. Mgt | |

1. Preliminares

En el presente informe de resultados se presenta los resultados del área superficial BET de la siguiente muestra:

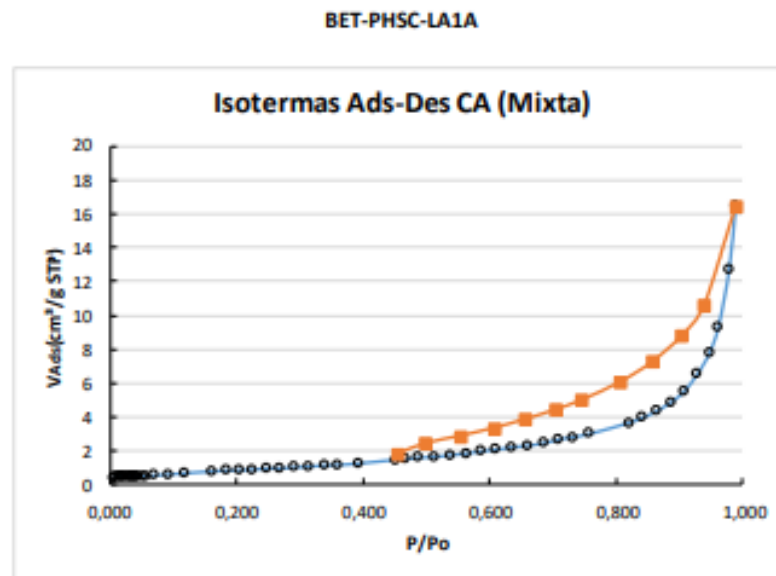
| MUESTRA | DESCRIPCIÓN |
|-------------------|--------------------------------|
| BET-PHSC-CAOLÍN-A | MUESTRA DE CAOLÍN – GRAIMAN |

La muestra fue sometida a la desgasificación para eliminar posibles impurezas en la misma, la temperatura de desgasificación fue de 100°C por un periodo de 24 horas antes de la obtención de las isothermas de adsorción con N₂ gaseoso. Los resultados presentados fueron sometidos a un test de coherencia que constó de tres etapas:

- Evolución de Qads con P/P₀:** Para aprobar esta etapa, Qads debe mostrar una tendencia incremental a medida que aumenta P/P₀.
- Determinación del valor de P/P₀ estadístico de monocapa:** Este resultado debe estar comprendido entre el valor máximo y mínimo de P/P₀ en el rango de datos seleccionado.
- Prueba de Rouquerol:** El valor de P/P₀ estadístico de monocapa no debe presentar una desviación mayor al 10% con respecto al valor calculado de P/P₀ de monocapa experimental en el rango de datos seleccionado.

2. Resultados

Anexo 2 Análisis del área superficial del caolín Parte 2



a) Evolución de Qads con P/P₀:

BET-PHSC-LA1A

Tabla 1. Rango de datos seleccionado.

| (P/P ₀) | Q Ads (cm ³ /g STP) | Qads(1-P/P ₀) |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 0,051 | 0,5173 | 0,49093115 |
| 0,057 | 0,5261 | 0,495996032 |
| 0,069 | 0,5531 | 0,515197716 |
| 0,093 | 0,6104 | 0,553594345 |
| 0,117 | 0,6834 | 0,60357478 |
| 0,162 | 0,7918 | 0,663883126 |
| 0,183 | 0,8374 | 0,683850986 |

Anexo 3 Análisis del área superficial del caolín Parte 3

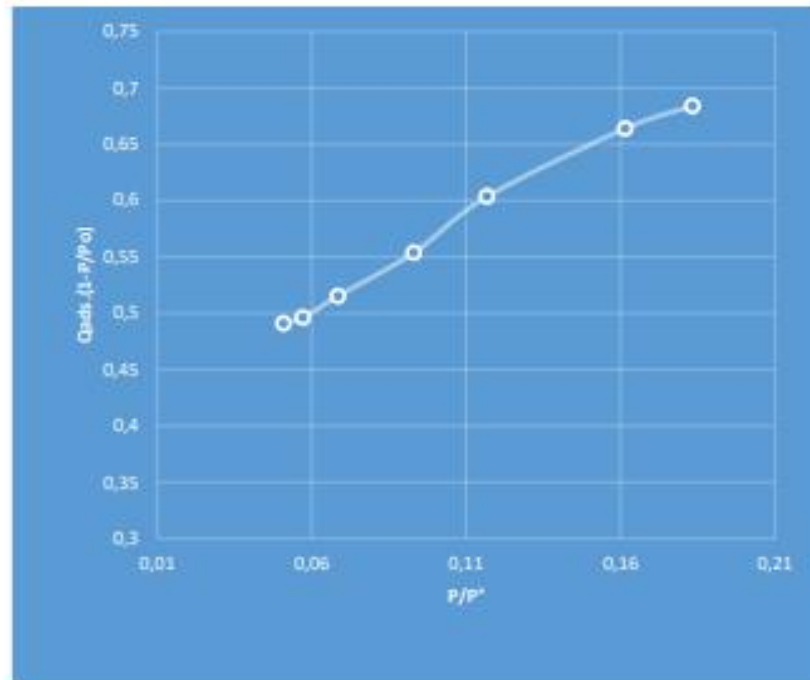


Figura 1. Gráfica de Qads vs. P/P0

Se evidencia una tendencia incremental de Qads con respecto a P/P0. Se aprueba esta etapa.

b) Determinación del valor de P/P₀ estadístico de monocapa:

Tabla 2. Determinación de P/P0 estadística de monocapa

| | | |
|--------------------------------------|--------|---------------|
| C = | | 26,59 |
| Gamme de P/P0 | | |
| | Min. = | 0,0510 |
| | Max. = | 0,183364 |
| $(P/P_0)_{mono} = 1/(C^{1/2} + 1) =$ | | 0,1624 |

c) Prueba de Rouquerol

Anexo 4 Análisis del área superficial del caolín Parte 4

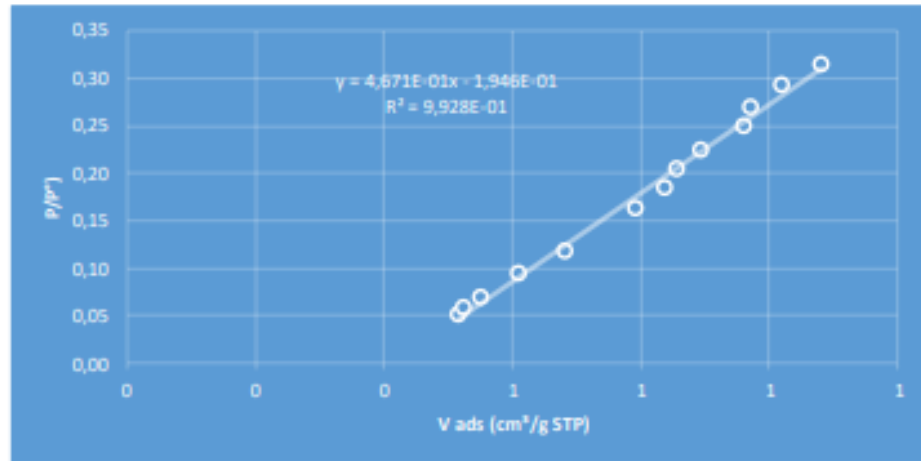


Figura 2. Gráfica del rango de datos seleccionado con su coeficiente de regresión.

Se evidencia que P/P_0 estadístico de monocapa se encuentra en el rango de P/P_0 seleccionado. Se aprueba esta etapa.

| | | |
|--|-------------|------------------------|
| Datos BET : | | |
| $V_{mono} =$ | 0,789409302 | cm ³ /g STP |
| $C =$ | 26,587 | |
| $(P/P^0)_{mono} =$ | | 0,1622 |
| <i>$(P/P_0)_{mono}$ estadística según Rouquerol</i> | | |
| $(P/P^0)_{mono} = 1/(C^{1/2}+1) =$ | | 0,1624 |
| Desviación entre los valores $(P/P^0)_{mono} =$ | | 0,2 |

Se evidencia que existe un 0.2 % de desviación. Se aprueba esta etapa.

d) Área superficial obtenida

Después de aprobar el test de coherencia, el área superficial obtenida fue de 34,805 m²/g.

Anexo 5 Material fino



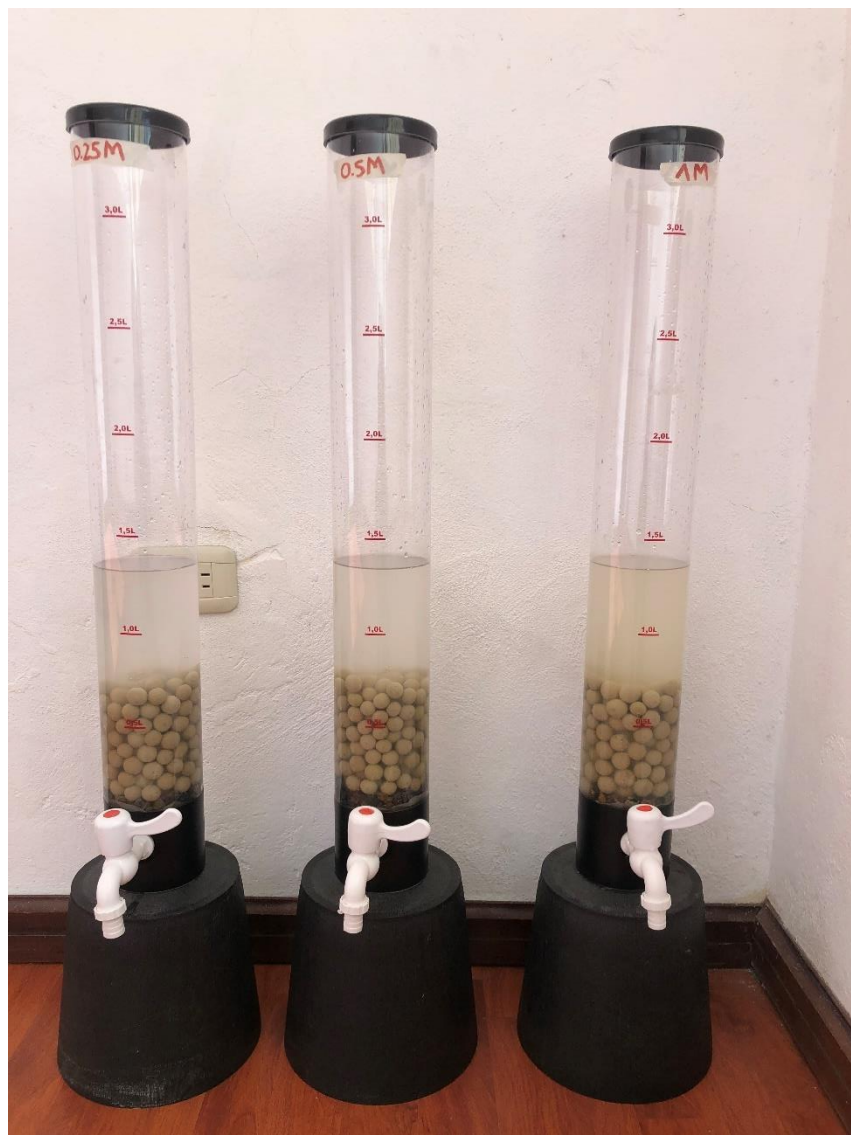
Anexo 6 Material grueso.



Anexo 7 Aglomeración del caolín para las tres columnas



Anexo 8 Columnas de lixiviación con el ácido depositado.



Anexo 9 Columnas después de 8 horas de lixiviación.



Anexo 10 Recolección de muestras al día 5



Anexo 11 Recolección de muestras al día 10.



Anexo 12 Recolección de muestras al día 15.



Anexo 13 Recolección de muestras al día 20.



Análisis y resultados de la remoción de hierro del caolín.

Anexo 14 Análisis de la lixiviación al día 5.



| Información del cliente | |
|-------------------------|----------------------------|
| Cliente : | Nelly Villa Ruiz |
| Teléfono : | 0979404837 |
| Dirección : | Chugchilan y Miguel Guaman |

Fecha de ingreso: 22/8/2022 10:00:27

Fecha de ensayo : 22/8/2022 10:30

Fecha de entrega: 22/8/2022 11:46



INFORME DE ENSAYO

Ref. N° 11753

| Cod. Lab. | N° Bag | pmr (ml) | T. M. | Detalle de muestra | analito | Fe |
|-----------|--------|----------|-------|--------------------|---------|---------|
| | | | | | unidad | ppm |
| | | | | | método | ser ERA |
| 27101 | 1 | 20,00 | liq | 0.25M | | 967,30 |
| 27102 | 1 | 20,00 | liq | 0.50M | | 1690,63 |
| 27103 | 1 | 20,00 | liq | 1M | | 3893,80 |

Información proporcionada por el cliente. JVmetals no es responsable de dicha información.
 N° Bag (cantidad de bolsas que conforman el cargamento para el análisis)
 pmr (peso de muestra recibida), TM (tipo de muestra), CC=concentrado, M=mostrón, A=arena

Información de método

Let ERA Determinación de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Fe, Mo, Bi por espectroscopia de absorción atómica

- > El ensayo fue realizado en la instalación del laboratorio, Sitio El Pacho.
- > Los resultados obtenidos en este informe corresponden estrictamente a los items ensayados.
- > Los items de ensayos se almacenarán por un periodo de 3 meses.
- > Esta prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización escrita del laboratorio JV metals.
- > JVmetals no se responsabiliza por el origen o toma de la muestra.





Ing. Químico José Buena Malla
Jefe de laboratorio

pag 1 de 1

Anexo 15 Análisis de lixiviación al día 10.



| Información del cliente | |
|-------------------------|----------------------------|
| Cliente : | Nelly Villa Ruiz |
| Telefono : | 0979404817 |
| Dirección : | Chugchilan y Miguel Guaman |

| | |
|--|---|
| Fecha de ingreso : 26/8/2022 13:56:34 Fecha de ensayo : 26/8/2022 14:00 Fecha de entrega : 26/8/2022 18:11 |  |
|--|---|

INFORME DE ENSAYO

Ref. N° 11838

| Cod. Lab. | N° Bag | pmr (ml) | T. M. | Detalle de muestra | analito | Fe |
|-----------|--------|----------|-------|--------------------|---------|---------|
| | | | | | unidad | ppm |
| | | | | | método | EAA |
| 27264 | 1 | 20,00 | liq | 0.25 M | | 922,50 |
| 27265 | 1 | 20,00 | liq | 0.50 M | | 1871,88 |
| 27266 | 1 | 20,00 | liq | 1.00 M | | 4006,25 |

...Información proporcionada por el cliente. JVmetals no es responsable de dicha información.
 N° Bag (cantidad de bolsas que conforman el compuesto para el análisis)
 pmr (peso de muestra recibida), TM (tipo de muestra), CC=concentrado, MI=mineral, Ar=arena

Información de método

EAA Determinación de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Fe, Mo, Bi, por espectroscopia de absorción atómica

- > El ensayo fue realizado en la instalación del laboratorio, Sitio El Pache.
- > Los resultados obtenidos en este informe corresponden solamente a los items ensayados.
- > Los items de ensayos se almacenaran por un periodo de 2 meses.
- > Esta prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización escrita del laboratorio JV metals.
- > JVmetals no se responsabiliza por el origen o toma de la muestra.



Ing. Quím. José Bueno Malla
 Jefe de laboratorio

pag 1 de 1

Anexo 16 Análisis de lixiviación al día 15.



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO

MAYORES BENEFICIOS, MEJOR PRODUCCIÓN

| Información del cliente | |
|-------------------------|------------------------------|
| Cliente | : Nelly Villa Ruiz |
| Telefono | : 0979404837 |
| Dirección | : Chugchilan y Miguel Guaman |

Fecha de ingreso : 31/8/2022 8:57:44

Fecha de ensayo : 31-8-22 12h00

Fecha de entrega : 31/8/2022 13:29



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO

INFORME DE ENSAYO

Ref. N° 11899

| Cod. Lab. | N° Bag | cmr (ml) | T. M. | Detalle de muestra | analito | Fe |
|-----------|--------|----------|-------|--------------------|---------|---------|
| | | | | | unidad | ppm |
| | | | | | metodo | UAA |
| 27384 | 1 | 20,00 | Liq | 0.25 M | | 786,25 |
| 27385 | 1 | 20,00 | Liq | 0.50 M | | 1709,40 |
| 27386 | 1 | 20,00 | Liq | 1.00 M | | 3556,25 |

Información proporcionada por el cliente. JVmetals no es responsable de dicha información.
 N° Bag (cantidad de bolsas que conforman el compuesto para el análisis)
 cmr (cantidad de muestra recibida), TM (tipo de muestra), CC=concentrado, M=mostrón, A=arena, Liq=Líquida

Información de método

EAA Determinación de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Fe, Mo, Bi, por espectroscopia de absorción atómica

- > El ensayo fue realizado en la instalación del laboratorio, Sitio El Pache.
- > Los resultados obtenidos en este informe corresponden solamente a los items ensayados.
- > Los items de ensayos se almacenaran por un periodo de 2 meses.
- > Esta prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización escrita del laboratorio JV metals.
- > JVmetals no es responsable por el origen o toma de la muestra.



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO



Ing. Quím. José Bueno Malla
 Jefe de laboratorio
 099-15-1386379

pag 1 de 1
 Fin del informe

Anexo 17 Análisis de lixiviación al día 20.



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO

MAYORES BENEFICIOS, MEJOR PRODUCCIÓN

| Información del cliente | |
|-------------------------|----------------------------|
| Cliente : | Nelly Villa Ruiz |
| Telefono : | 0979404837 |
| Dirección : | Chugchilas y Miguel Guaman |

Fecha de ingreso : 5/9/2022 8:43:51

Fecha de ensayo : 5/9/2022 9:00

Fecha de entrega : 5/9/2022 14:40



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO

INFORME DE ENSAYO

Ref. N° 11942

| Cod. Lab. | N° Bag | vibr (ml) | T. M. | Detalle de muestra | analito | Fe |
|-----------|--------|-----------|-------|--------------------|---------|---------|
| | | | | | unidad | ppm |
| | | | | | método | usa |
| 27473 | 1 | 20,00 | liq. | 0,25 M/HCl | | 698,73 |
| 27474 | 1 | 20,00 | liq. | 0,50 M/HCl | | 1553,13 |
| 27475 | 1 | 20,00 | liq. | 1 M/HCl | | 3212,30 |

...Información proporcionada por el cliente, JVmetals no es responsable de dicha información.
 N° Bag (cantidad de bolsas que conforman el compuesto para el análisis)
 vibr (volumen de muestra recibida), T.M (tipo de muestra), CC=concentrado, M=material, Ar=arena, liq = líquido

Información de método

EAA Determinación de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Fe, Mo, Bi, por espectroscopia de absorción atómica

- > El ensayo fue realizado en la instalación del laboratorio, Sitio El Pacho.
- > Los resultados obtenidos en este informe corresponden solamente a los ítems ensayados.
- > Los ítems de ensayos se almacenaran por un periodo de 2 meses.
- > Esta prohibida la reproducción parcial de este informe sin la autorización escrita del laboratorio JV metals.
- > JVmetals no se responsabiliza por el origen o toma de la muestra.



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO

Ing. Quím. José Bruno Malla

Jefe de laboratorio

00115-1386578

pag 1 de 1

Fin del informe