



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE
HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A
PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”,
CAMOTÁN, CHIQUIMULA**

Mónica Saraí Soto Pivaral

Asesorado por el Ing. Mariano Arturo J. Eskenasy García

Guatemala, mayo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE
HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A
PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

MÓNICA SARAÍ SOTO PIVARAL

ASESORADO POR EL ING. MARIANO ARTURO ESKENASY GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I: Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II: Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V:
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR: Ing. César Alfonso García Sierra
EXAMINADOR: Ing. Federico Guillermo Salazar
EXAMINADOR: Ing. Alberto Arango Siekaviza
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE
HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A
PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”,
CAMOTÁN, CHIQUIMULA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 16 de octubre de 2007.

Mónica Sarai Soto Pivaral.

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS:** Por cuidarme y llenar de bendiciones mi vida. Porque creyendo en ti puedo confiar en que toda acción digna y buena tiene recompensa.
- Mi padre:** **Dr. Juan José Soto Morales**
Por ser mi modelo a seguir. Gracias por tu amor, cuidados y consejos, los cuales vivirán en mi corazón y a través de ellos, estarás presente a lo largo de mi vida. Mi amor, respeto y admiración son eternos.
- Mi madre:** **Dora Bernabé Pivaral Torres**
Por apoyarme en los momentos difíciles, por su amor y cuidados que han permitido que yo llegue a este momento de mi vida.
- Mis hermanos:** **Whendy, Danilo, Marvin y Carlos**
Por su cariño y apoyo incondicional. Las diferencias individuales que nos separan nos unen y engrandecen como familia.
- Mis sobrinos** **J. Roberto, J. Fernando, Andrea y Luisa**
Por su cariño y por enseñarme a disfrutar las cosas simples y maravillosas que nos

ofrece la vida.

Mis amigos y compañeros

Por sus muestras de afecto y por los buenos y malos momentos compartidos. Gracias por marcar mi vida y hacerla más plena y feliz.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por proveerme no sólo de educación, sino también de amigos, compañeros, recuerdos, alegrías y tristezas. Siempre será un orgullo y un honor ser san carlista

AGRADECIMIENTOS A:

El Ing. César Alfonso García Guerra Por compartir su sabiduría, experiencia y amistad. Y demostrar que existen dignos profesionales y catedráticos. Gracias por su valiosa asesoría y revisión de este trabajo de graduación.

Ing. Mariano Esquenazi, Ing. Jorge Luis Avalos, Ing. Dilma Mexicanos, Lic. Eduardo Orozco, Lic. Rony Ayala Por su contribución en este trabajo de graduación

Personal de Escuela Técnica: Por su paciencia y colaboración.

Ing. Santiago Méndez, Inga. Vera Marroquín, Galia: Por su apoyo y cariño.

A mi compañera de trabajo de graduación **Ginger Méndez**
Porque más que una compañera de graduación has sido una amiga incondicional. Gracias por tu apoyo y cariño, y porque el esfuerzo conjunto hizo posible la realización de este trabajo de graduación. ¡Lo logramos!

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|--------------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VIII |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | XVI |
| GLOSARIO..... | XXI |
| RESUMEN..... | XXV |
| HIPÓTESIS..... | XXVII |
| OBJETIVOS..... | XXIX |
| INTRODUCCIÓN..... | XXXI |
| | |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL MUNICIPIO CAMOTÁN, DEL DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA..... | 1 |
| 1.1. Ubicación del municipio de Camotán..... | 1 |
| 1.2. Vías de comunicación..... | 1 |
| 1.3. Hidrografía..... | 2 |
| 1.4. Orografía..... | 3 |
| 1.5. Climatología y temperatura..... | 4 |
| 1.6. Geología y minería..... | 4 |
| | |
| 2. HEMATITA..... | 7 |
| 2.1. Historia de la hematita | 7 |
| 2.2. Estructura y características de la hematita..... | 8 |
| 2.2.1. Información general..... | 8 |
| 2.2.2. Características físicas..... | 8 |
| 2.2.3. Cristalografía..... | 9 |
| 2.3. Clases de hematita..... | 10 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.4. | La hematita en Guatemala..... | 11 |
| 3. | GRANULOMETRÍA DE MINERALES..... | 13 |
| 3.1. | Análisis granulométrico..... | 13 |
| 3.2. | Métodos de análisis granulométrico..... | 13 |
| 3.2.1. | Método del tamizado..... | 13 |
| 3.2.2. | Método de sedimentación..... | 15 |
| 3.2.2.1. | Método del hidrómetro..... | 15 |
| 3.2.2.2. | Método de la pipeta..... | 16 |
| 3.3. | Curva granulométrica..... | 16 |
| 4. | AGITACIÓN Y MEZCLADO..... | 17 |
| 4.1. | Equipo para agitación..... | 18 |
| 4.2. | Agitador propulsor de tres aspas..... | 19 |
| 4.3. | Selección del agitador e intervalos de viscosidad..... | 19 |
| 4.4. | Trayectoria del flujo en la agitación..... | 20 |
| 5. | PROCESO DE LIXIVIACIÓN..... | 23 |
| 5.1. | Lixiviación inorgánica..... | 23 |
| 5.2. | Preparación del sólido para el proceso de lixiviación..... | 25 |
| 5.3. | Lixiviación en estado no estacionario..... | 26 |
| 5.4. | Variables que afectan la velocidad de lixiviación..... | 27 |
| 5.4.1. | Temperatura..... | 27 |
| 5.4.2. | Concentración del solvente..... | 28 |
| 5.4.3. | Tamaño de la partícula | 28 |
| 5.4.4. | Porosidad..... | 28 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.4.5. | Agitación..... | 28 |
| 6. | FILTRACIÓN POR PLACAS Y MARCOS..... | 29 |
| 6.1. | Filtración..... | 29 |
| 6.2. | Filtración a presión (placas y marcos)..... | 30 |
| 6.3. | Aplicaciones, ventajas y desventajas del uso del filtro prensa.... | 31 |
| 6.3.1. | Aplicaciones del filtro prensa..... | 32 |
| 6.3.2. | Ventajas del filtro prensa..... | 32 |
| 6.3.3. | Desventajas del filtro prensa..... | 32 |
| 6.4. | Ciclos de filtración..... | 33 |
| 6.4.1. | Cerramiento de la prensa..... | 33 |
| 6.4.2. | Rellenado..... | 33 |
| 6.4.3. | Filtración | 33 |
| 6.4.4. | Apertura del filtro..... | 34 |
| 6.4.5. | Limpieza..... | 34 |
| 6.5. | Capacidad de filtración..... | 35 |
| 7. | COAGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS..... | 37 |
| 7.1. | Tratamiento de aguas..... | 37 |
| 7.2. | Objetivo y definición de coagulación..... | 38 |
| 7.3. | Mecanismos de coagulación..... | 40 |
| 7.3.1. | Compresión de la doble capa..... | 40 |
| 7.3.2. | Adsorción y neutralización de cargas..... | 42 |
| 7.3.3. | Atrapamiento de las partículas en un precipitado..... | 42 |
| 7.3.4. | Adsorción y puente..... | 43 |
| 7.4. | Coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas..... | 44 |
| 7.5. | Etapas o fases de la coagulación..... | 45 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 7.6. | Tipos de coagulación..... | 46 |
| 7.6.1. | Coagulación por absorción..... | 46 |
| 7.6.2. | Coagulación por barrido..... | 47 |
| 8. | DESESTABILIZACIÓN POR AL(III) Y FE(III) EN EL TRATAMIENTO DE AGUA Y DEL AGUA RESIDUAL..... | 49 |
| 9. | ESTÁNDAR DE LA AWWA PARA SULFATO FÉRRICO LÍQUIDO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS (AWWA B406) | 57 |
| 9.1. | Manufactura del sulfato férrico para el tratamiento de aguas.... | 57 |
| 9.2. | Consideraciones de almacenamiento y manejo del sulfato férrico | 58 |
| 9.3. | Requerimientos del sulfato férrico líquido..... | 59 |
| 9.3.1. | Requerimientos físicos..... | 59 |
| 9.3.2. | Requerimientos químicos..... | 59 |
| 9.3.2.1. | Hierro férrico..... | 59 |
| 9.3.2.2. | Hierro ferroso..... | 59 |
| 9.3.2.3. | Material insoluble en agua..... | 60 |
| 9.3.2.4. | Ácido libre..... | 60 |
| 9.3.2.5. | Cloruros | 60 |
| 10. | TOXICIDAD DEL ALUMINIO Y SU USO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS..... | 61 |
| 10.1. | Toxicidad del aluminio y su relación con la actividad cerebral.... | 61 |
| 10.2. | Uso del sulfato de aluminio en el tratamiento de agua..... | 63 |
| 11. | IMPACTO AMBIENTAL..... | 65 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 11.1. | Efectos en la salud provocados por los reactivos de lixiviación empleados en la producción de sulfato férrico..... | 65 |
| 11.2. | Efectos ambientales provocados por los reactivos de lixiviación empleados en la producción de sulfato férrico..... | 66 |
| 11.3. | El déficit mundial del tratamiento de aguas..... | 67 |
| 12. | METODOLOGÍA..... | 69 |
| 12.1. | Recursos humanos..... | 69 |
| 12.2. | Infraestructura..... | 69 |
| 12.3. | Obtención de muestras..... | 69 |
| 12.4. | Condiciones de operación..... | 70 |
| 12.4.1. | Fijas..... | 70 |
| 12.4.1.1. | Relaciones de lixiviación..... | 70 |
| 12.4.1.2. | Condiciones de operación fijas por equipo..... | 70 |
| 12.4.1.2.1. | Tamizador..... | 70 |
| 12.4.1.2.2. | Sistema de agitación..... | 70 |
| 12.4.1.2.3. | Reactor..... | 70 |
| 12.4.2. | Variables..... | 71 |
| 12.4.2.1. | Concentraciones y cantidades de reactivos..... | 71 |
| 12.5. | Reacción química..... | 71 |
| 12.6. | Muestra de cálculo..... | 71 |
| 12.6.1. | Cálculo de cantidad teórica de $\text{H}_2\text{SO}_{4(98\%)}$ respecto al tamaño de lote..... | 71 |
| 12.6.2. | Cálculo de las constantes de lixiviación..... | 71 |
| 12.6.3. | Determinación del volumen mínimo de solución con base en los requerimientos de la solución de sulfato férrico | |

| | |
|---|------------|
| y los limites de operación del filtro prensa (más del 9% de hierro (III) en solución, 2228g de arcillas)..... | 72 |
| 12.7. Material..... | 77 |
| 12.7.1. Material de apoyo..... | 77 |
| 12.8. Materia prima..... | 77 |
| 12.8.1. Ácido sulfúrico..... | 77 |
| 12.8.1.1. Descripción física y química..... | 77 |
| 12.8.2. Hematita roja..... | 78 |
| 12.8.2.1. Descripción física y química..... | 78 |
| 12.9. Equipo..... | 78 |
| 12.9.1. Especificaciones técnicas de la unidad por equipos..... | 79 |
| 12.9.1.1. Tamizador..... | 79 |
| 12.9.1.2. Sistema de agitación..... | 79 |
| 12.9.1.3. Reactor..... | 80 |
| 12.9.1.4. Compresor..... | 80 |
| 12.9.1.5. Bomba de desplazamiento positivo..... | 80 |
| 12.9.1.6. Filtro prensa..... | 81 |
| 12.10. Especificación técnica de la unidad completa de trabajo..... | 81 |
| 12.11. Modelo estadístico..... | 85 |
| 12.12. Manejo de resultados..... | 85 |
| 12.13. Manejo de desechos..... | 86 |
| 13. RESULTADOS..... | 87 |
| 14. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... | 97 |
| CONCLUSIONES..... | 101 |
| RECOMENDACIONES..... | 103 |

| | |
|--|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 105 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 107 |
| APÉNDICES..... | 109 |
| APÉNDICE 1. DIAGRAMAS..... | 109 |
| APÉNDICE 2. MUESTRA DE CÁLCULO..... | 113 |
| APÉNDICE 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... | 125 |
| APÉNDICE 4. DATOS ORIGINALES..... | 131 |
| APÉNDICE 5. DATOS CALCULADOS..... | 135 |
| APÉNDICE 6. FOTOGRAFÍAS DE LA EXPERIMENTACIÓN..... | 147 |
| ANEXOS | 153 |
| ANEXO 1. MAPA..... | 153 |
| ANEXO 2. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRAS DE SULFATO FÉRRICO..... | 155 |
| ANEXO 3. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRA DE HEMATITA EMPLEANDO TRES CONCENTRACIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..... | 161 |
| ANEXO 4. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRA DE HEMATITA EMPLEANDO ÁCIDO SULFÚRICO AL 20% EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..... | 165 |
| ANEXO 5. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRAS AGOTADAS DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE HEMATITA..... | 166 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Estructura cristalina de la hematita | 9 |
| 2 | Diversas clases de hematita | 11 |
| 3 | Agitador propulsor de tres aspas | 18 |
| 4 | Agitador de tres aspas | 19 |
| 5 | Tanque con reflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco | 21 |
| 6 | Filtro prensa (placas y marcos) | 31 |
| 7 | Pasos del ciclo de filtración | 34 |
| 8 | Coagulación | 39 |
| 9 | Fuerzas de atracción y repulsión | 41 |
| 10 | Reestabilización de las partículas | 41 |
| 11 | Atropamiento de las partículas en un flóculo | 43 |
| 12 | Efecto de puente de las partículas de suspensión | 44 |
| 13 | Fases de la coagulación | 45 |
| 14 | Coagulación por absorción | 46 |
| 15 | Coagulación por barrido | 47 |
| 16 | Solubilidad en el equilibrio de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (a 25°C) | 50 |
| 17 | Representación esquemática de la coagulación observada en las pruebas de jarras utilizando sales de aluminio (I II) y hierro (III) a un pH constante | 52 |
| 18 | Gráfica de correlación polinomial para datos de la tabla VII | 76 |
| 19 | Unidad de lixiviación y filtración del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San | 82 |

Carlos de Guatemala

| | | |
|----|---|-----|
| 20 | Diagrama del equipo para el proceso de recuperación de hierro (III) en forma de sulfato férrico en solución de ácido sulfúrico, a partir de lixiviación de mineral de hematita | 83 |
| 21 | Diagrama de flujo del proceso de recuperación de hierro (II I) en forma de sulfato férrico en solución de ácido sulfúrico, a partir de lixiviación de mineral de hematita | 84 |
| 22 | Gráfica de recuperación de Fe(III) en solución de sulfato férrico para tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo | 88 |
| 23 | Gráfica de densidad de la solución de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función de la extracción de Fe(III) | 90 |
| 24 | Gráfica de pH de la solución de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función de la extracción de Fe(III) | 91 |
| 25 | Gráfica de densidad de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función de la extracción de Fe(III) | 93 |
| 26 | Gráfica de pH de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función de la extracción de Fe(III) | 94 |
| 27 | Gráfica de correlación para estimar el tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación empleando ácido sulfúrico al 20%, para las condiciones experimentales realizadas | 95 |
| 28 | Procedimiento para la elaboración de la tesis de lixiviación de hematita | 109 |
| 29 | Diagrama esquemático del proceso de lixiviación | 110 |
| 30 | Diagrama de Ishikawa del proceso de lixiviación (diagrama de espina de pescado) | 111 |
| 31 | Gráfica de la relación diámetro tanque/ diámetro del impulsor | 120 |

| | | |
|----|--|-----|
| 32 | Preparación de lote de hematita. | 147 |
| 33 | Preparación de las soluciones de H_2SO_4 . | 147 |
| 34 | Inicio de reacción | 148 |
| 35 | Proceso de agitación. | 148 |
| 36 | Recolección de muestras en solución para análisis de laboratorio | 149 |
| 37 | Filtración de muestras a nivel laboratorio | 149 |
| 38 | Solución de sulfato férrico filtrada | 150 |
| 39 | Equipo para medición de pH y densidad de las muestras | 150 |
| 40 | Proceso de filtración a nivel planta piloto con filtro prensa | 151 |
| 41 | Mapa de Camotán, Chiquimula | 153 |
| 42 | Explicación geológica del mapa de Chiquimula | 154 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I | Rango de matices | 15 |
| II | Relaciones de lixiviación | 70 |
| III | Condiciones de operación fijas del tamizador | 70 |
| IV | Condiciones de operación fijas del sistema de agitación | 70 |
| V | Condiciones de operación fijas del reactor | 70 |
| VI | Concentraciones y cantidades de reactivos | 71 |
| VII | Tabulación de relación proporcional de porcentaje de Fe(III) extractable, en función de la concentración de ácido, para un lote de 3700g de hematita a temperatura ambiente. | 75 |
| VIII | Descripción física y química del ácido sulfúrico | 77 |
| IX | Descripción física de la hematita roja | 78 |

| | | |
|-------|--|----|
| X | Descripción química de la hematita roja | 78 |
| XI | Especificaciones técnicas del tamizador | 79 |
| XII | Especificaciones técnicas del sistema de agitación | 79 |
| XIII | Especificaciones técnicas del reactor | 80 |
| XIV | Especificaciones técnicas del compresor | 80 |
| XV | Especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo | 80 |
| XVI | Especificaciones técnicas del filtro prensa | 81 |
| XVII | Datos experimentales en el proceso de lixiviación de hematita | 86 |
| XVIII | Hoja de datos originales para el análisis de Sulfato férrico. | 86 |
| XIX | Porcentaje de extracción de hierro (III) a partir de hematita , utilizando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico en función del tiempo | 87 |
| XX | Eficiencia en extracción de Fe(III) para cada concentración de solución de ácido sulfúrico utilizada , y en función del tiempo | 89 |
| XXI | Densidad de las soluciones de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico, en función del tiempo | 90 |
| XXII | Comparación de las características de la solución de sulfato férrico obtenida por lixiviación , empleando tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo, con base en las especificaciones para soluciones de sulfato férrico según los requerimientos establecidos (pH 2 y %Fe(III) 9) para el tratamiento de agua establecidos por la norma B406 de la AWWA | 91 |
| XXIII | Porcentaje de extracción de hierro (III) a partir de hematita utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo | 92 |

| | | |
|--------|--|-----|
| XXIV | Eficiencia en extracción de Fe(III) empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo | 92 |
| XXV | Densidad experimental de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo | 93 |
| XXVI | Comparación de las características de la solución de sulfato férrico obtenida por lixiviación empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo, con base en las especificaciones para soluciones de sulfato férrico, según los requerimientos establecidos (pH 2 y %Fe(III) 9) para el tratamiento de agua establecidos por la norma B406 de la AWWA | 94 |
| XXVII | Tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación, empleando ácido sulfúrico al 20%, para las condiciones experimentales realizadas | 95 |
| XXVIII | Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores | 125 |
| XXIX | Ecuaciones para el análisis de variancia de dos factores | 126 |
| XXX | Datos de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso, empleando tres concentraciones de solvente extractor en función del tiempo | 128 |
| XXXI | Datos intermedios totales de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso, empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo | 128 |
| XXXII | Fuentes de variación de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso, empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo | 128 |
| XXXIII | Extracción de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico, en función del tiempo | 131 |
| XXXIV | Densidad de la solución de sulfato férrico empleando tres | 131 |

| | | |
|---------|--|-----|
| | concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico , en función del tiempo | |
| XXXV | pH de la solución de sulfato férrico empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico , en función del tiempo | 132 |
| XXXVI | Extracción de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) empleando ácido sulfúrico al 20%, en función del tiempo | 132 |
| XXXVII | Densidad de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20%, en función del tiempo | 133 |
| XXXVIII | pH de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20%, en función del tiempo | 133 |
| XXXIX | Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 135 |
| XL | Datos del cálculo de la recuperación de Fe(III) en solución (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 136 |
| XLI | Extracción promedio de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 136 |
| XLII | Extracción promedio de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 137 |
| XLIII | Densidad promedio de la solución de sulfato férrico , empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 137 |
| XLIV | pH promedio de la solución de sulfato férrico empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 138 |
| XLV | Datos del cálculo de la cantidad de Fe(III) lixiviado , | 139 |

| | | |
|--------|--|-----|
| | empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | |
| XLVI | Datos del cálculo del porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico | 140 |
| XLVII | Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico, empleando ácido sulfúrico al 20% | 140 |
| XLVIII | Datos del cálculo de la recuperación de Fe(III) en solución (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20% | 141 |
| XLIX | Extracción promedio de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20% | 141 |
| L | Extracción promedio de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20% | 141 |
| LI | Densidad promedio de la solución de sulfato férrico, empleando ácido sulfúrico al 20% | 142 |
| LII | pH promedio de la solución de sulfato férrico, empleando ácido sulfúrico al 20% | 142 |
| LIII | Datos del cálculo de la cantidad de Fe(III) lixiviado, empleando ácido sulfúrico al 20% | 143 |
| LIV | Datos del cálculo del porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III), empleando ácido sulfúrico al 20% | 143 |
| LV | Tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación, para las condiciones experimentales realizadas | 144 |
| LVI | Características físicas de la hematita | 144 |
| LVII | Características físicas de las soluciones de ácido sulfúrico | 144 |
| LVIII | Dimensiones de reactor | 144 |
| LIX | Volumen y altura de operación para cada concentración de ácido sulfúrico | 144 |
| LX | Datos intermedios para la determinación de potencia, según | 145 |

| | | |
|--------|--|-----|
| | la concentración de solución de ácido sulfúrico utilizado | |
| LXI | Valores de potencia, número de revoluciones de propulsor, viscosidad de solución y número de Reynolds para cada concentración de ácido sulfúrico | 145 |
| LXII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 30min | 155 |
| LXIII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 60min | 155 |
| LXIV | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 90min | 156 |
| LXV | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 120min | 156 |
| LXVI | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 30min | 156 |
| LXVII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 60min | 157 |
| LXVIII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 90min | 157 |
| LXIX | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 120min | 158 |
| LXX | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 30min | 158 |
| LXXI | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 60min | 159 |
| LXXII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 90min | 159 |
| LXXIII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 120min | 160 |
| LXXIV | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 161 |

| | | |
|---------|---|-----|
| | 0.5 horas | |
| LXXV | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 161 |
| | 1 horas | |
| LXXVI | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 162 |
| | 1.5 horas | |
| LXXVII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 162 |
| | 2 horas | |
| LXXVIII | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 163 |
| | 3 horas | |
| LXXIX | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 163 |
| | 7 horas | |
| LXXX | Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, | 164 |
| | 12 horas | |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|---|
| Km | Kilómetro |
| g | Gramo |
| % | Porcentaje |
| cm | Centímetro |
| Å | Ángstrom |
| °C | Grado Celsius |
| μ | Micro |
| mm | Milímetro |
| Ø | Diámetro |
| # | Número |
| rpm | Revoluciones por minuto |
| cp | Centipoise |
| Pa | Pascal |
| bar | Bares |
| l | Litro |
| Fig. | Figura |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| ppm | Partes por millón |
| AWWA | American Water Works Association |
| °F | Grado Fahrenheit |
| hp | Caballo de potencia |
| V | Voltio |
| A | Amperio |
| Psig | Libras por pulgada cuadrada manométrica |

| | |
|------------------------|---|
| gal | Galón |
| lb | Libra |
| | Desviación estándar |
| | Nivel de significancia |
| min | Minuto |
| \bar{X} | Media aritmética (promedio) |
| C | Corrida |
| Hi | Hipótesis alternativa |
| Ho | Hipótesis nula |
| Z' | Altura arriba del plano medio del impulsor superior |
| ρ_m | Densidad de la suspensión debajo de Z' |
| v_m | Volumen de la suspensión |
| ϕ_{Sm} | Fracción volumen de sólidos en la suspensión debajo de Z', adimensional |
| μ_l | Viscosidad del solvente |
| $\Delta\rho$ | Densidad de la partícula/sólido menos densidad del solvente |
| Re | Número de Reynolds |
| Ss | Cantidad de compuesto libre de adsorbato |
| ρ_l | Densidad del solvente |
| g_c | Factor de conversión |
| P_{min} | Potencia del agitador |
| V_{t,s} | Velocidad terminal de asentamiento de esferas simples |
| n | Número de impulsores sobre el eje |
| d_i | Diámetro del impulsor |
| d_p | Diámetro de la partícula |
| g | Aceleración de la gravedad |

- N** Rapidez de giro
- P** Potencia del agitador transmitida al fluido o lodos.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

GLOSARIO

| | |
|-------------------|--|
| Aluviones | Ríos de rocas, tierra y otros elementos saturados de agua. Se desarrollan cuando el agua se acumula rápidamente en el suelo, a raíz de lluvia intensa o deshielos rápidos, convirtiendo el terreno en un río de barro. |
| Botroidal | Hábito en forma de grupo de masas globulares como racimos de uvas. |
| Coloidal | Sistema físico-químico compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). |
| Conchoidal | Fractura de superficie curva lisa. |
| Dureza | Resistencia ofrecida por un mineral a la abrasión, o al raspado. |
| Enmienda | Sustancia que se mezcla con las tierras para modificar favorablemente sus propiedades y hacerlas más productivas. |
| Esquisto | Grupo de rocas metamórficas de grado medio, notable principalmente por la preponderancia de minerales laminares tales como la mica, la clorita, el talco, grafito y otros. |
| Filita | Roca procedente del metamorfismo de la arcilla y arcillitas. De bajo grado de metamorfismo, con tamaño de cristales mayor que el de las pizarras, pero menor que el de los esquistos. |
| Filones | Masa metalífera o pétreo que rellena una antigua quiebra de las rocas de un terreno. |

| | |
|----------------------|--|
| Flóculo | Grumo de materia orgánica formado por agregación de sólidos en suspensión. |
| Fractura | Carácter de la superficie obtenida cuando sustancias cristalinas se rompen, en direcciones distintas de aquellas en las que puede tener lugar una exfoliación o ésta es muy débil, proporcionan superficies de fractura muy fáciles. |
| Ganga | Mineral sin valor que acompaña a los minerales metálicos, o mena, en los filones. |
| Granatíferos | Piedra fina compuesta de silicato doble de alúmina y de hierro, y cuyo color es variable. |
| Hábito | Tipo de desarrollo del cristal. Tendencia de los minerales a presentarse bajo una determinada figura geométrica |
| Higroscópico | Compuestos que atraen agua en forma de vapor o de líquido de su ambiente. |
| Ígnea | Roca que se forma cuando la roca (magma), se enfría y solidifica, con o sin cristalización, bajo la superficie como rocas intrusivas (plutónicas), o en la superficie como rocas extrusivas (volcánicas). |
| Mena | Mineral metalífero antes de limpiarse. |
| Metamórfica | Rocas formadas por la presión y las altas temperaturas. Proceden indistintamente de la transformación de rocas ígneas y de rocas sedimentarias. |
| Metasomatismo | Es el metamorfismo debido al contacto de la roca con una fuente intensa de calor, por medio del cual las rocas se convierten en metamórficas |
| Neocomianos | Referencia a la parte inferior del período Cretácico. |
| Paleolítico | Perteneciente o relativo al primer período de la edad de piedra, al que corresponde la piedra tallada. |

| | |
|---------------------|--|
| Paleozóico | Segundo período de la historia de la tierra, el más antiguo de los sedimentarios. |
| Reniforme | Hábito de fibras radiadas, que terminan en superficies redondas con forma o figura de riñón |
| Sedimentaria | Rocas que se forman por acumulación de sedimentos que, sometidos a procesos físicos y químicos (diagénesis), resultan en un material de cierta consistencia. |
| Sinuosidad | Cualidad de lo que es sinuoso, ondulado o curvo hueco. Concavidad que forma una cosa encorvada. |

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es evaluar la técnica de extracción de Fe(III) por lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico, a partir de mineral de hematita a nivel planta piloto

La hematita fue obtenida de la mina "Quebrada María" ubicada en Camotán, Chiquimula. La práctica experimental fue desarrollada en la Unidad de Lixiviación de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos.

Se evaluó la extracción de Fe(III) a partir de la reacción del óxido férrico contenido en la hematita y el solvente extractor (ácido sulfúrico diluido), analizando las muestras producidas de sulfato férrico. Se tomaron alícuotas de la mezcla reaccionante cada 30 minutos durante dos horas para diferentes concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido al 20, 25 y 30%). En el experimento se obtuvieron observaciones duplicadas en cada combinación de tratamientos.

Las alícuotas de sulfato férrico, fueron filtradas y analizadas por medio de fluorescencia de rayos X, con lo cual se determinó el porcentaje de Fe(III) en cada solución.

Con base en estos resultados se determinó que existe variación significativa en el porcentaje de extracción de Fe(III) a partir de hematita mediante el cambio en la concentración de solvente extractor en función del tiempo, corroborando la hipótesis alternativa.

El mayor porcentaje de extracción se dio al emplear ácido sulfúrico al 20% en un tiempo de reacción de 120 minutos.

Se realizó una segunda experimentación empleando ácido sulfúrico al 20% y recolectando muestras a las 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 7 y 12 horas de iniciado el proceso de lixiviación.

Con base en los resultados obtenidos en la segunda experimentación, se obtuvo el modelo de correlación exponencial $Fe(III)_{lixiviado} / gFe^{+3} / gFe_2(SO_4)_3 = 1.534(t)^{0.513}$ con el cual se concluyó que el tiempo de agotamiento máximo de Fe(III) por lixiviación para las condiciones experimentales utilizadas es de 44.74 horas y para llegar al mínimo del 9% establecido por la AWWA se necesitará un tiempo de 31.47 horas de proceso de lixiviación.

HIPÓTESIS

Existe variación significativa en el porcentaje de extracción de hierro (III) a partir de hematita, mediante el cambio en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo.

Hipótesis estadísticas

Ha

Sí hay diferencias significativas en el porcentaje de extracción de hierro (III), a partir de hematita mediante el cambio en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo.

Ho

No hay diferencias significativas.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

OBJETIVOS

General

Evaluar la técnica de extracción de Fe(III) por lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico, a partir de mineral de hematita a nivel planta piloto

Específicos

1. Determinar el porcentaje de extracción de hierro (III) respecto a tres concentraciones de ácido sulfúrico, en función del tiempo de lixiviación.
2. Determinar la eficiencia del proceso de lixiviación de hierro como %Fe(III) para cada concentración de solución de ácido sulfúrico utilizada, y en función del tiempo.
3. Comparar las características de la solución de sulfato férrico obtenida por lixiviación con base en las especificaciones para soluciones de sulfato férrico, según los requerimientos establecidos (pH y %Fe(III)) para el tratamiento de agua, establecidos por la norma B406 de la AWWA.
4. Estimar el tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación para las condiciones experimentales realizadas.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

INTRODUCCIÓN

Los procesos mineros han tenido un gran auge a nivel centroamericano. En la región oriente de Guatemala existen varias minas que presentan conformaciones de hematita.

La empresa "Sales, Ácidos y Solventes", se encarga a través de su asociación "Geominas" de explotar este mineral, el cual es extraído de la mina "Quebrada María", ubicada en Camotán, Chiquimula

El óxido de hierro presente en la hematita, es empleado para la producción de sulfato de hierro (III) destinado al uso en el tratamiento de aguas, en el cual se emplea como coagulante. El porcentaje de arcillas y otros materiales presentes junto al óxido de hierro en la muestra mineral, han ocasionado que al emplearlo en el tratamiento de aguas se formen insolubles que bloquean los procesos. Por lo cual, es necesario extraer la mayor cantidad posible Fe(III) de la hematita, para formular una solución de sulfato férrico adecuada.

El objetivo del presente trabajo de graduación es analizar el proceso de extracción de Fe(III) por medio de una lixiviación en medio ácido a nivel planta piloto, a partir de mineral de hematita roja, y determinar si existe variación significativa en el porcentaje de extracción de Fe(III) contenida en las soluciones de sulfato férrico, a partir de hematita mediante el cambio en la concentración de solvente extractor en función del tiempo.

También determinar la viabilidad de emplear la solución de sulfato férrico obtenida, como coagulante en el tratamiento de agua, según las especificaciones establecidas por la AWWA.

1 DESCRIPCIÓN DEL MUNICIPIO CAMOTÁN, DEL DEPARTAMENTO DE CHIQUIMULA

1.1 Ubicación del municipio de Camotán

El municipio de Camotán está ubicado en el departamento de Chiquimula, se encuentra en las coordenadas latitud norte 14°49'13" longitud oeste 89°22'24". La distancia de la cabecera municipal de Camotán a la cabecera departamental de Chiquimula, es de 32 Km. por la carretera que conduce al lugar fronterizo el Florido, con la república de Honduras. La extensión del municipio es de 232 kilómetros cuadrados (km^2), está formado por la cabecera municipal, 29 aldeas y 78 caseríos. Colinda al norte con el municipio de la Unión departamento de Zacapa; al sur con el municipio de Esquipulas Chiquimula; al este con Copán Ruinas que se encuentra en el territorio Hondureño y al oeste con el municipio de Jocotán, Chiquimula. (Mapa de Camotán, Chiquimula ver anexo II y III).

1.2 Vías de comunicación

El departamento de Chiquimula está situado en el extremo oriental de Guatemala, lindante con la frontera de Honduras y El Salvador. Su territorio forma parte de las tierras altas, por lo que se caracteriza por tener montañas de cierta altura y ríos cortos pero caudalosos.

Las ciudades más importantes son Chiquimula, la cabecera departamental, Esquipulas y Alotepeque. Lo cruzan de norte a sur dos importantes ejes de comunicación: la línea ferroviaria Zacapa -San Salvador y la

carretera meridiana que enlaza Zacapa con la frontera salvadoreña. Las principales carreteras que atraviesan el departamento son la ruta nacional 18 que parte de la capital y conduce a Esquipulas, la ruta nacional 20 que proviene de Zacapa, pasa por Concepción Las Minas y conduce a la frontera y la CA -10 que pasa por Esquipulas y llega a la frontera con Honduras. Entre Chiquimula y la ciudad de Guatemala hay 168 kilómetros.

Tanto las vías antes mencionadas como los accesos propiamente a los sitios de explotación se encuentran permanentemente en buen estado de conservación, lo que permite su uso durante todo del año.

1.3 Hidrografía

Dentro del departamento de Chiquimula son dos las principales cuencas hidrográficas, cuyas corrientes a su vez son tributarias de las que hacia el norte descargan sus aguas en el mar Caribe, y por el sur, después de atravesar la República de El Salvador, desembocan en el Océano Pacífico.

En el municipio de Camotán, penetra procedente de Honduras, el río Copán, que después se conoce como río Grande o Camotán y aguas abajo como Jocotán, el que después de recibir numerosos afluentes, a su vez descarga en el río Grande, el cual dentro del territorio de Zacapa se denomina Grande o de Zacapa. Hacia el sureste y sur del departamento y sirviendo parcialmente de linderos con Honduras y El Salvador, respectivamente, están los ríos: Frío y Sesecapa, Anguiatú y Ostúa, entre los principales de la región.

1.4 Orografía

La cordillera central proviene de Jalapa, penetra por la parte sur del departamento, donde forma estribaciones de la Sierra del Merendón en el confín de la república de Honduras y de El Salvador.

Todavía dentro del departamento de Jalapa, en el municipio de San Luís Jilotepeque, el macizo que se conoce localmente como montaña de Pinula, desciende por su lado Este al valle regado por el río Colima, que ya dentro del departamento de Chiquimula forma a un ancho valle en el municipio de Ipala, que por el Sur tiene el volcán de Ipala.

El sistema montañoso que penetra desde el departamento de Zacapa desciende a los municipios de Camotán, Jocotán y Chiquimula. El macizo montañoso es bastante irregular y sus estribaciones continúan dentro de los municipios de Chiquimula, Jocotán, Camotán, Olopa, San Jacinto, San Juan Ermita y San José La Arada. Hacia el sur del departamento, el sistema orográfico forma también algunas mesetas de varias alturas dentro de los municipios de Quezaltepeque, Esquipulas y Concepción las Minas que, con sus repliegues, hondonadas y precipicios, se integran a la Sierra del Merendón.

De especial importancia son los cerros: Montecristo, que forma un Trifinio con Honduras y El Salvador, y el cerro Brujo, que es lindero con El Salvador, ambos dentro de la Sierra del Merendón.

1.5 Climatología y temperatura

La climatología de la zona depende principalmente del régimen de lluvias, la temperatura y la presión atmosférica, Su territorio es quebrado y debido a que el macizo montañoso es irregular, pues sus alturas varían entre los 1,350 metros sobre el nivel del mar en Olopa, y los 435 en San José La Arada, su clima aunque es bastante parejo, tiene algunas variantes. Las temperaturas varían entre 20 y 35 grados Celsius.

1.6 Geología y minería

En Chiquimula, se pueden encontrar en gran parte de su territorio, carbonatos neocomianos; rocas del período paleozoico, donde predominan las rocas metamórficas sin dividir, filitas, esquistos cloríticas y granatíferos, esquistos y gneses de cuarzo, los aluviones cuaternarios; y predominan las fallas geológicas: inferidas y cubiertas.

Chiquimula aparte de ser uno de los departamentos más antiguos de la República, goza además de excelentes condiciones por su calidad y variedad de su suelo, y es rico en minas de plata, plomo, hierro, cobre, antimonio, cuarzo, hulla y algunos lavaderos de oro.

En esta región destaca en importancia la mineralización económica de oro con pequeñas cantidades de plata en venas de cuarzo y zonas silicificadas emplazadas en fracturas. La mineralogía más común es pirita y arsenopirita con calcopirita, covelita y oro nativo como minerales asociados y está relacionada a procesos epitermales asociados a intrusiones de cuerpos ígneos. Este yacimiento se localiza en el distrito minero de Chiquimula, en donde también ocurren depósitos de Cu en Xororaguá Hacienda el Santo, Pb-Zn-Ag en

Tercerón y zonas de óxidos de hierro en san José la Arada, localidades aledañas a la ciudad de Chiquimula.

Los depósitos más importantes de Cu-Pb-Zn-Ag y Au son los que ocurren en el distrito minero de Concepción las Minas, localizado en la parte sureste del departamento de Chiquimula. Aquí yacen depósitos de Zn-Pb-Ag en forma de lentes o mantos dentro de calizas alteradas a, producto de un metasomatismo de contacto. También mineralización de Pb-Zn ocurre en forma de vetas emplazadas en fracturas dentro de rocas volcánicas del Terciario. Las vetas en rocas volcánicas presentan todas las características típicas de depósitos epitermales rellenando fisuras originadas por esfuerzos tensionales. La mineralización consiste principalmente en sulfuros de zinc, plomo-plata y cobre con calcita y cuarzo como minerales de ganga.

Otros yacimientos de importancia económica, lo constituyen una serie de cuerpos de óxidos de hierro que ocurren en el distrito minero de Jocotán - Camotán, al noreste de Chiquimula, los cuales se han venido explotando para surtir la industria del cemento tanto de Guatemala como de El Salvador.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

2 HEMATITA

2.1 Historia de la hematita

Teofrasto y Plinio describieron una roca, haematitis, rojo -sangre en color (de aquí su nombre) y sólida en textura, que consideraron una gema adecuada para elaborar sellos, anillos y amuletos.

Algunas veces presenta un brillo metálico brillante, con el color del polvo, o raya, café-rojizo, algunas veces llamado rojo indio, que fue un pigmento usado para pintar las cabañas, carros de ferrocarril y todas las aplicaciones donde se deseaba un color barato y excepcionalmente durable.

La hematita mezclada con grasa animal da el tono rojizo de las pinturas de animales del Paleolítico encontradas por ejemplo en las cuevas de los Pirineos. Esto mismo, aparentemente fue aplicado en las paredes de las tumbas egipcias, donde su color es tan fresco como lo fue hace miles de años. También se aplicaba a la decoración de cara y cuerpo, actividad que aún se mantiene en el rojo de muchas mejillas femeninas. Otra aplicación de la hematita finamente molida, que aún no tiene rival, es como un agente de pulido fino para metales y lentes ópticos. Los cristales de hematita se pueden formar en cavidades, como en la Isla de Elba o en las cuevas de cristal del macizo de St. Gotthard en Suiza; o puede aparecer junto con cuarzo, barita y fluorita como en las minas de Cumberland, Inglaterra y en las provincias de Minas Gerais de Brasil. Otro tipo de hematita, de forma botroidal y/o reniforme y de textura superficial sedosa se encuentra también en Cumberland y es celosamente deseada por los coleccionistas.

2.2 Estructura y características de la hematita

2.2.1 Información general

- Nombre: Hematita
- Fórmula química: Fe_2O_3 (óxido férrico)
- Peso molecular: 159.69 g con un 69.94% de hierro y un 30.06% de oxígeno
- Tipo básico: Se encuentra en los tres tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias.
- Formación u origen: Mineral raro en las rocas intrusivas, pero es común en las extrusivas, ya que requiere de un ambiente oxidante. También es común en sedimentarias por diagenesis de limonita; en metamórfica de bajo grado y como producto de sublimación en las exhalaciones volcánicas.

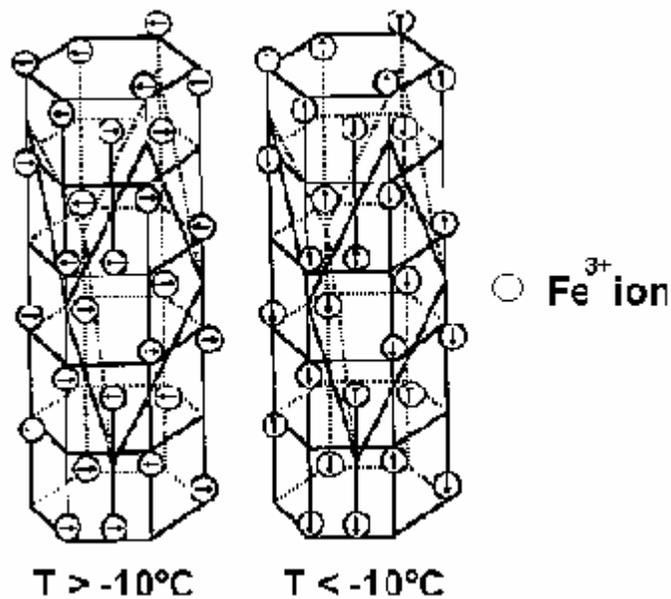
2.2.2 Características físicas

- Brillo: Metálico y ocasionalmente resplandeciente o mate, opaco
- Transparencia: Translucido sobre bordes delgados
- Color: Este mineral es de color gris acero, oscuro o negro y cuando es terroso su color es rojo,
- Dureza en la escala Mohs: de 5.5 a 6.5
- Tenacidad: Frágil
- Fractura: Conchoidal
- Densidad: 5.27 g/cm^3
- Habito: Reniforme
- Textura. Dura y constituye pequeños individuos de forma irregular.

2.2.3 Cristalografía

- Sistema cristalino: Trigonal
- Clase: Hexagonal escalenohedral
- Parámetros de celda: $a = 5.036\text{Å}$, $c = 13.749\text{Å}$
- Radio: 1 : 2.73 Å
- Volumen de celda unitaria: 301.98 Å³, Z:6
- Ángulos: Alpha = 90, beta = 90, gamma = 120°

Figura 1. Estructura cristalina de la hematita



Fuente: Referencia bibliográfica No. 14

2.3 Clases de hematita

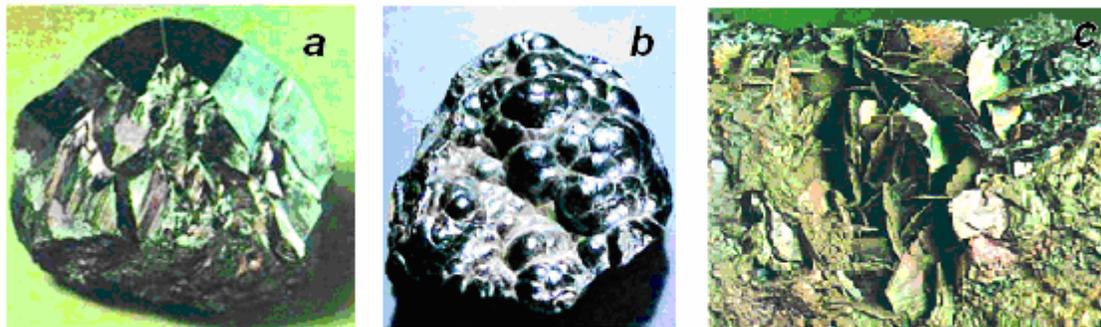
Las principales variedades de hematita son:

- Hematita roja anhidra, que forma concreciones de brillo metálico.
- Los ocre rojos, que son una mezcla de hematita y arcilla.
- La hematita parda o limonita, son óxidos de hierro hidratados entre cuyas variedades figura la goethita, la lepidocrocita, etcétera.

La hematita es usualmente terrosa y ocre cuando se deposita en condiciones sedimentarias, pero cuando cristaliza bajo las altas temperaturas y presiones que prevalecen a profundidad en el interior de la Tierra, puede formar placas cristalinas brillantes. En las rocas que muestran delgadas placas paralelas se denominan de tipo esquistoso. A causa de que las placas son como espejos, esta variedad es llamada especularita o hematita especular (del latín speculum, espejo)

Algunas veces se encuentran cristales octaedrales que semejan magnetita, pero que no son magnéticos y que además poseen la característica raya rojiza de la hematita. Esos cristales, llamados martita, son pseudomorfos de hematita a partir de magnetita, esto es, fueron cristales de magnetita que por alteración química cambiaron a hematita sin cambiar su forma externa. La martita es un mineral importante en unas cuantas localidades, tal como Star Lake en las Adirondacks de Nueva York, Magnetogorsk en las Montañas Urales, y en Cerro de Mercado en la Sierra Madre Occidental.

Figura 2. Diversas clases de hematita



Fuente: Referencia bibliográfica No. 4

2.4 Hematita en Guatemala

En Guatemala, existe una cantidad considerable de afloramientos de minerales metálicos, sin embargo, de la mayoría de ellos no se conoce aún con certeza su valor económico y la factibilidad de explotación.

Dentro de los principales yacimientos de minerales metálicos de acuerdo a su importancia económica tenemos las de hierro, las cuales se presentan principalmente en forma de óxidos.

Se han encontrado manifestaciones y depósitos de regular tamaño en Camotán (departamento de Chiquimula). Cubulco (Baja Verapaz) y en las arenas titaníferas en las costas del pacífico. El hierro es uno de los principales metales para la industria metal-mecánica, además se usa como elemento estructural en la industria pesada, el ferrocarril, la industria del automóvil etc. En Guatemala se usa como uno de los componentes para la fabricación del cemento.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

3 GRANULOMETRÍA DE MINERALES

3.1 Análisis granulométrico

Proceso para determinar la proporción en que participan los granos del suelo, en función de sus tamaños. Esa proporción se llama gradación del suelo.

La gradación por tamaños es diferente al término geológico en el cual se alude a los procesos de construcción (agradación) y la destrucción (degradación) del relieve, por fuerzas y procesos tales como tectonismo, vulcanismo, erosión, sedimentación, etc.

3.2 Métodos de análisis granulométrico

Comprende dos clases de ensayos: El de tamizado para las partículas grueso – granulares (gravas, arenas) y el de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos, arcillas), pues no son discriminables por tamizado.

3.2.1 Método del tamizado

El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas .

El tamizado se realiza en húmedo, si bien, lo más frecuente es operar en seco. El tamizado en seco se aplica a materias que contienen poca humedad natural o que fueron desecadas anteriormente.

El tamizado en húmedo se efectúa con adición de agua al material, con el único fin que el líquido arrastre a través del tamiz a las partículas más finas.

Los tamices industriales se construyen con tela metálica, telas de seda o plástico, barras metálicas, placas metálicas perforadas, o alambres de sección transversal triangular. Se utilizan diferentes metales, siendo el acero al carbono y el acero inoxidable los más frecuentes.

Los tamaños de los tamices normalizados están comprendidos entre 4 pulg. y 400 mallas, y se dispone de tamices comerciales de tela metálica con aberturas tan pequeñas como $1\ \mu\text{m}$.

Los tamices más finos, aproximadamente de 150 mallas no se utilizan habitualmente debido que con partículas muy finas generalmente resultan más económicos otros métodos de separación.

La separación en el intervalo de tamaños entre 4 y 48 mallas recibe el nombre de tamizado fino y para tamaños inferiores a 48 mallas el tamizado se considera ultrafino.

Una vez se pasa el suelo por la estufa y se pulverice, se hace pasar por una serie organizada de tamices, de agujeros con tamaños decrecientes y conocidos, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos; el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz. Con sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo por la serie de tamices, de arriba abajo, para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla.

Tabla I. Rango de tamices

| Descripción | ϕ abertura (mm) | Descripción | ϕ abertura (μm) |
|-------------|----------------------|-------------|-----------------------------------|
| 1½plg | 37.5 | No. 30 | 600 |
| 1plg | 25 | No. 40 | 425 |
| ¾plg | 19 | No. 50 | 300 |
| ⅜plg | 9.5 | No. 60 | 250 |
| No. 4 | 4.75 | No. 80 | 180 |
| No. 8 | 2.36 | No. 100 | 150 |
| No.10 | 2 | No. 140 | 106 |
| | | No. 200 | 75 |
| | | No. 325 | 45 |

Fuente: Referencia bibliográfica No. 2

3.2.2 Método de sedimentación

Son dos, el método del hidrómetro y el método de la pipeta. Ambos basados en las características de la sedimentación de las partículas del suelo en un medio acuoso. Se aplican, tales métodos, al "suelo fino", es decir, al que ha quedado en el fondo de los tamices y que se denomina "pasa - 200", material constituido por limos y arcillas.

3.2.2.1 Método del hidrómetro

Se toma una probeta con agua, se mete el suelo, se agita hasta que sea uniforme la suspensión; luego se deja en reposo para ir midiendo, con hidrómetro (para distintos tiempos transcurridos), la densidad de la suspensión, la que disminuye a medida que las partículas se asientan. La profundidad del densímetro, variable con la densidad de la suspensión (Arquímedes), es la base para calcular esa distribución de tamaños de granos finos que pasa a la malla o tamiz # 200, con $\phi = 0,074$ mm. El sistema se calcula con "La Ley de Stokes".

3.2.2.2 Método de la pipeta

A diferencia del anterior, aquí se deja constante el valor de H. También se parte de una suspensión agua – suelo, uniforme en el instante inicial, y que con el tiempo se modifica, dado que las partículas de mayor diámetro se precipitan a mayor velocidad, con fundamento en la Ley de Stokes. A distintos tiempos, desde el inicio, se toman muestras de la suspensión, a una misma profundidad predeterminada. De cada muestra obtenida, se determina el peso de los sólidos, contenido por unidad de volumen de la suspensión, lo que constituye la base para el cálculo de la distribución (en proporción) de los tamaños de las partículas finas.

3.3 Curva granulométrica

Los resultados de los ensayos de tamizado y sedimentación se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica. La fracción gruesa tendrá denominaciones, según el sistema:

Para los suelos grueso – granulares, el diámetro equivalente está referido al agujero cuadrado de la malla. Para los finos, al diámetro de una esfera. La curva se dibuja en papel semilogarítmico. Con la escala aritmética (ordenadas) los porcentajes en peso de partículas con ϕ menor p que cada uno de los lados de las abscisas. En escala logarítmica (abscisas) los tamaños de los granos en milímetros. Esta escala, en razón de que los ϕ varían de cm a μm . Esta clasificación es necesaria en geotecnia, pero no suficiente. Se complementa siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad.

4 AGITACIÓN Y MEZCLADO

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos, Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí.

Existen varios objetivos en la agitación de fluidos y algunos de ellos son:

- Mezclado de dos líquidos miscibles, tales como alcohol etílico y agua.
- Disolución de sólidos en líquidos, tales como sal en agua.
- Dispersión de un gas en un líquido en forma de burbujas pequeñas, como en el caso del oxígeno del aire en una suspensión de microorganismos para la fermentación, o para el proceso de activación de lodos en el tratamiento de aguas de desperdicio.
- Suspensión de partículas sólidas finas en un líquido, tal como en la hidrogenación catalítica de un líquido, donde las partículas del catalizador sólido y las burbujas de hidrógeno se dispersan en un líquido.
- Agitación de un fluido para aumentar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa en las paredes del recipiente.

4.1 Equipo para agitación

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje.

- ❑ Agitador propulsor de tres aspas
- ❑ Agitadores de paletas
- ❑ Agitadores de turbina
- ❑ Agitadores de banda helicoidal

Figura 3. **Agitador propulsor de tres aspas**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

4.2 Agitador propulsor de tres aspas

Existen varios tipos de agitadores de uso común. Uno de los más conocidos es el agitador de tres aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas. El agitador puede ser móvil para introducirlo lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm (revoluciones por minuto) y son propios para líquidos de baja viscosidad.

Figura 4. Agitador de tres aspas



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

4.3 Selección del agitador e intervalos de viscosidad.

La viscosidad del fluido es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de agitador. En seguida se dan algunas indicaciones de los intervalos de viscosidad de esos agitadores. Los propulsores se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 Pa*s (3000 cp); las turbinas pueden usarse

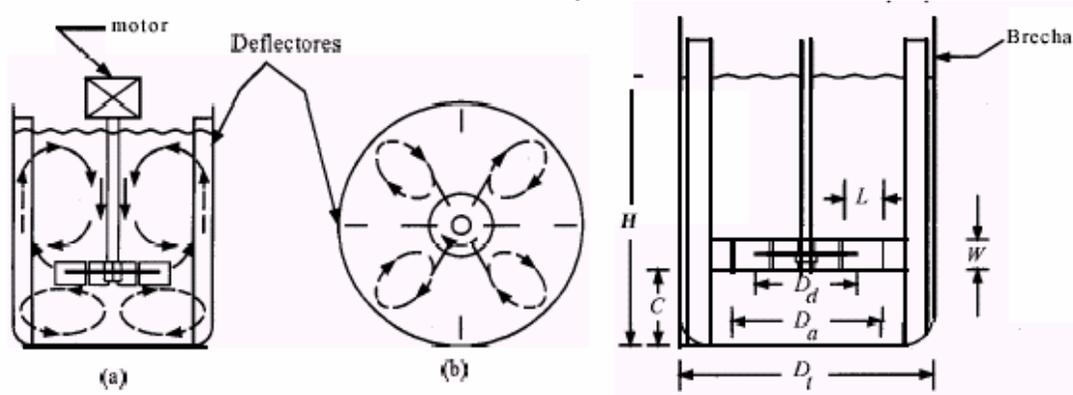
por debajo de unos 100 Pa*s (100,000 cp); las paletas modificadas como los agitadores tipo ancla se pueden usar desde más de 50 Pa*s hasta unos 500 Pa*s (500,000 cp); los agitadores helicoidales y de tipo banda se suelen usar desde arriba de este intervalo hasta cerca de 1,000 Pa*s y se han utilizado hasta para más de 25,000 Pas. Para viscosidades mayores de unos 2.5 a 5 Pa*s (5,000 cp) o más, los deflectores no se necesitan porque hay poca turbulencia.

4.4 Trayectoria del flujo en la agitación

La trayectoria del flujo en un tanque de agitación depende de las propiedades del fluido, de la geometría del tanque, del tipo de deflectores y del propio agitador. Si el propulsor u otro agitador va montado verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo tipo remolino. Esto suele ser indeseable debido a que se atrapa aire, se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas y otros efectos perjudiciales, en especial cuando se opera a velocidades altas. Para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro cuando se trata de propulsores de baja potencia. Sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias.

Para lograr una agitación vigorosa con agitadores verticales, se acostumbra el empleo de deflectores para reducir el tamaño del remolino y obtener así un buen mezclado. En la figura 5 se muestran deflectores montados en las paredes en posición vertical. Casi siempre basta con cuatro deflectores, que tengan anchura de cerca de 1/12 del diámetro del tanque para turbinas y propulsores.

Figura 5. Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco, que muestra patrones de flujo: a) vista lateral, b) vista superior, c) d) dimensiones de la turbina y el tanque.



Fuente: Referencia bibliográfica No. 7

El impulsor de la turbina fuerza al líquido en dirección radial hasta las paredes donde se divide, en una porción que fluye hacia arriba, hasta tocar la superficie para regresar hacia el propulsor, mientras la otra porción fluye hacia abajo, se trata de tanques con grandes profundidades de líquido en comparación con el diámetro del tanque, se montan dos o tres propulsores en el mismo eje, y cada uno actúa como un mezclador individual. El propulsor inferior está cerca de 1 diámetro del propulsor por arriba del fondo del tanque.

En un sistema de agitación, el gasto volumétrico del fluido que mueve el impulsor (esto es, la velocidad de circulación), es un factor muy importante para asegurarse de agitar la totalidad del volumen del mezclador en tiempo razonable. Además, la turbulencia en la corriente de agitación es decisiva para el mezclado, puesto que arrastra al material hacia la corriente. Algunos sistemas de agitación requieren una alta turbulencia con velocidades de circulación bajas; otros se basan en turbulencias bajas con altas velocidades de circulación. Esto casi siempre depende de los tipos de fluidos que se mezclan y del grado de mezclado que se solicite.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

5 PROCESO DE LIXIVIACIÓN

5.1 Lixiviación inorgánica

Muchos compuestos inorgánicos se encuentran como mezclas de diferentes componentes en un sólido. Para separar el soluto deseado, eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, ésta se pone en contacto con una fase líquida. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, o que permite una separación de los componentes originales del sólido. Este proceso se llama lixiviación líquido-sólido o simplemente, lixiviación. La operación unitaria se puede considerar como una extracción, aunque el término también se refiere a la extracción líquido-líquido. Cuando a lixiviación tiene por objeto eliminar con agua un componente indeseable de un sólido, el proceso recibe el nombre de lavado.

En la lixiviación de materiales solubles del interior de una partícula por acción de un disolvente, el proceso general consiste en los siguientes pasos: el disolvente se transfiere del volumen de solución a la superficie del sólido. Después, dicho disolvente penetra o se difunde en el sólido. El soluto se disuelve en el disolvente. Entonces, el soluto se difunde a través de la mezcla de sólido y disolvente hasta la superficie de la partícula. Finalmente, el soluto se transfiere a la solución general.

Los numerosos fenómenos que se presentan en este proceso hacen poco práctico y casi imposible aplicar una teoría definida a la acción de lixiviación. En general, la velocidad de transferencia del disolvente de la solución general hasta la superficie del sólido es bastante rápida, y la velocidad hacia el interior

del sólido puede ser rápida o lenta. Sin embargo, en la mayoría de los casos éstas no son las etapas que limitan a velocidad del proceso total de lixiviación. La transferencia de disolventes suelen ocurrir al principio, cuando las partículas se ponen en contacto con el disolvente; aun así, la disolución del soluto en el disolvente en el interior del sólido puede ser un simple proceso físico de disolución o una verdadera reacción química que libera al soluto para la disolución. El conocimiento del proceso de disolución es bastante limitado y el mecanismo puede ser diferente en cada caso.

La velocidad de difusión del soluto a través del sólido, y la del disolvente hasta la superficie del sólido suelen ser la resistencia que controla el proceso global de lixiviación y dependen de diversos factores.

Si el sólido está constituido por una estructura inerte porosa, con el soluto y el disolvente localizados en los poros del sólido, la difusión a través del sólido poroso se puede describir como una difusividad efectiva. Se requieren entonces, la fracción de espacios huecos y la sinuosidad, para la difusión en sólidos porosos.

La resistencia a la transferencia de masa del soluto desde la superficie sólida hasta el disolvente general, suele ser bastante pequeña en comparación con la resistencia a la difusión dentro del propio sólido. Esto se ha demostrado en la lixiviación de soya, donde el grado de agitación del disolvente externo no produce efectos apreciables sobre la velocidad de extracción

Los procesos de lixiviación son de uso común en las industria metalúrgica. Los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables, y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales

solubles. Las sales de cobre se disuelven o se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico o amoniacaes. Las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico-amoniaco-oxígeno. La lixiviación de oro a partir de sus minerales, se basa en el uso de una solución acuosa de cianuro de sodio.

El equipo de lixiviación puede ser de etapas o de contacto continuo; algunas industrias requieren un tipo especial de equipo, pero en general las dos técnicas usadas son: rociar el líquido sobre el sólido o sumergir el sólido completamente en el líquido, el equipo usado en cada caso depende mucho de la forma física de los sólidos y del costo. Partículas trituradas (grandes) son tratadas en lechos fijos por métodos de percolación. Partículas molidas (finamente divididas) son puestas en suspensión en tanques llenos de solvente por medio de agitación.

5.2 Preparación del sólido para el proceso de lixiviación

El método de preparación del sólido depende en alto grado de la proporción del constituyente soluble presente, de su distribución en el material sólido original, de la naturaleza del sólido, que puede estar constituido por células vegetales o el material soluble estar totalmente rodeado por una matriz de materia insoluble, y del tamaño de partícula original.

Si la materia soluble está rodeada de una matriz de materia insoluble, el disolvente se debe difundir hacia el interior para ponerse en contacto y disolver el material soluble, y después difundirse hacia afuera. Esto ocurre en muchos procesos hidrometalúrgicos, en los que se lixivian sales metálicas de minerales metálicos. En estos casos se procede a una trituración y molienda previa de los

materiales para aumentar la velocidad de lixiviación, pues de esta manera las porciones solubles quedan más accesibles a la acción del disolvente. Si la sustancia soluble está en solución sólida o ampliamente distribuida en la totalidad del sólido, la acción de lixiviación del disolvente forma canales pequeños. Esto hace que el paso de disolvente adicional resulte más fácil, por lo cual se puede prescindir de la molienda a tamaños muy pequeños. La molienda de las partículas es innecesaria cuando el material soluble está disuelto en una solución adherida al sólido. Entonces se puede emplear un simple lavado similar al de precipitados químicos.

5.3 Lixiviación en estado no estacionario

Las operaciones en estado no estacionario incluyen aquellas en que los sólidos y los líquidos se ponen en contacto únicamente en forma de lotes y también aquellas en que un lote del sólido se pone en contacto con una corriente que fluye continuamente del líquido (método por semilotes). Las partículas sólidas gruesas generalmente se tratan en lechos fijos mediante métodos de percolación, mientras que los sólidos finamente divididos, que pueden mantenerse más fácilmente en suspensión, pueden dispersarse en todo el líquido con la ayuda de algún tipo de agitador.

En la lixiviación en estado no estacionario, uno de los métodos más comunes empleados en la industria mineral es la lixiviación in situ, donde se permite que el disolvente pase por el mineral por percolación. En otros casos, el licor de lixiviación se bombea sobre una pila de mineral triturado y se recolecta al nivel del suelo a medida que escurre de dicha pila. El cobre se lixivia por este procedimiento con soluciones de ácido sulfúrico, a partir de minerales de sulfuro.

Los sólidos triturados suelen lixiviarse por percolación a través de lechos sólidos, estacionarios en recipientes con fondos perforados, para permitir el drenaje del disolvente. Los sólidos no deben ser demasiado finos, pues habría una alta resistencia al flujo. Algunas veces se colocan varios tanques en serie, que constituyen una batería de extracción, y se agrega disolvente nuevo al sólido que está casi extraído. Los tanques pueden ser de tipo abierto o bien cerrado, en cuyo caso se llaman difusores. El disolvente fluye a través de los tanques en serie, y se extrae del tanque más recientemente cargado, lo que simula una operación continua a contracorriente. Después de que un tanque ha sido lixiviado por completo, se añade carga nueva al tanque del otro extremo, a través de tuberías múltiples, de manera que no hay necesidad de mover los tanques para la operación a contracorriente. Este procedimiento suele llamarse sistema Shunks y se usa con mucha frecuencia en la lixiviación de nitrato de sodio de sus minerales, en la recuperación de taninos de cortezas y maderas, en la industria minera, en la industria del azúcar y en varias más.

5.4 Variables que afectan la velocidad de lixiviación

5.4.1 Temperatura

Al aumentar la temperatura se aumenta la velocidad porque la solubilidad es mayor, el aumento de temperatura es muy usado en procesos de reacción química. La temperatura máxima para cada sistema está limitada por: el punto de ebullición del solvente, el punto de degradación del producto o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía.

5.4.2 Concentración del solvente

La concentración del solvente es importante para soluciones acuosas, debido a la saturación y a la existencia de reacciones químicas, es de poca importancia cuando la extracción es controlada por difusión.

5.4.3 Tamaño de las partículas

La reducción de partículas tiene gran importancia, porque aumenta el área de contacto y disminuye el tiempo necesario para la extracción, sobre todo para sólidos de baja porosidad.

5.4.4 Porosidad

La porosidad permite que el líquido penetre a través de los canales formados por los poros dentro del sólido, aumentando así el área activa para la extracción.

5.4.5 Agitación

La agitación da una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión.

6 FILTRACIÓN POR PLACAS Y MARCOS

6.1 Filtración

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos. Las filtraciones comerciales cubren una amplia gama de aplicaciones. El fluido puede ser un gas o un líquido. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida. En algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas sólidas y en otros, basta con una eliminación parcial.

La alimentación o suspensión de entrada puede contener una gran carga de partículas sólidas o una proporción baja. Cuando la concentración es mínima, los filtros operan por tiempos muy largos, antes de que sea necesario limpiar el medio filtrante. Debido a la gran diversidad de problemas de filtración, se ha desarrollado un enorme número de equipos de filtración.

El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos.

Las variables que intervienen en la velocidad de filtración son ,

- La caída de presión desde la alimentación hasta el lado mas lejano del medio
- filtrante.
- El área de la superficie filtrante.
- La viscosidad del filtrado.
- La resistencia de la torta filtrante.
- La resistencia del medio filtrante y de las capas iniciales de la torta.

6.2 Filtración a presión (placas y marcos)

Los filtros a presión tienen un funcionamiento discontinuo y la alimentación es introducida en el sistema a altas presiones, el más característico es el filtro prensa de placas y marcos.

Un filtro se compone de una serie de chapas verticales, yuxtapuestas y acopladas. Estas chapas prensadas entre ellas cuenta con un sistema hidráulico-neumático que puede ser automático, semiautomático. La presión aplicada a las zonas unidad de cada filtro debe de soportar la presión interna de la cámara que se forma debido a la inyección mediante bomba del lodo al sistema.

Esta disposición de placas verticales forman cámaras de filtración estanca a la inmersión que permiten la fácil mecanización de la descarga de las pastas. Membranas filtrantes finamente y fijamente malladas se aplican en las dos grandes superficies crecientes en estas placas.

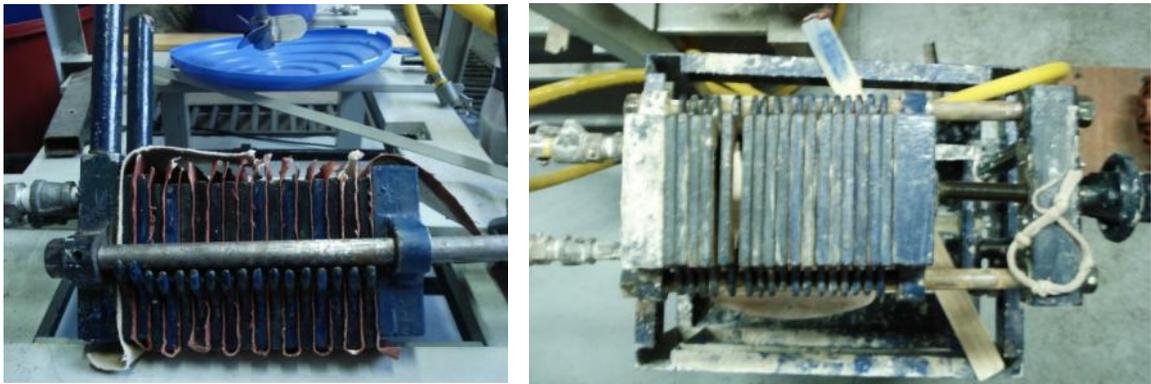
A través de orificios se alimenta el sistema de lodo para ser prensado en la cámara de filtración. Están generalmente colocados en el centro de estas placas permitiendo una distribución adecuada del flujo, presión adecuada y

mejor drenaje del lodo dentro de la cámara. Lodos sólidos se acumulan gradualmente en la cámara de filtración hasta que se genera una pasta compacta final.

Los marcos suelen ser cuadrados y miden entre 10 cm a 1,5 m de lado por 10 a 75 mm de espesor. El filtrado escurre por las irregularidades superficiales de las placas, llegando a un canal que recoge los líquidos de todas las placas.

Si se precisa el lavado del precipitado, se sustituye la corriente líquida turbia por la del líquido de lavado. Después se abre la prensa y se retira la torta del medio filtrante, terminando el ciclo de filtración. Se puede practicar un lavado más intenso de los precipitados si se utiliza un filtro de placas y marcos con placas lavadoras. El agua de lavado penetra por las placas lavadoras y pasa a través de las tortas contiguas.

Figura 6. Filtro prensa (placas y marcos)



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

6.3 Aplicaciones, ventajas y desventajas del uso del filtro prensa

6.3.1 Aplicaciones del filtro prensa

- ❑ Cuando el líquido turbio tiene gran cantidad de precipitado.
- ❑ Cuando la suspensión es difícil de filtrar.
- ❑ Cuando el precipitado es preciso lavarlo hasta el agotamiento.
- ❑ Cuando la producción no es excesivamente grande.

6.3.2 Ventajas del uso del filtro prensa

- ❑ Es muy versátil (se emplea para amplia gama de materiales).
- ❑ Coste de material bajo.
- ❑ Proporciona gran área de filtración en un espacio reducido.
- ❑ Se obtienen elevadas presiones.
- ❑ Resulta adecuado tanto si el producto principal es la torta como el líquido.

6.3.3 Desventajas del uso del filtro prensa

- ❑ Funcionamiento intermitente
- ❑ Deterioro rápido de la tela filtrante
- ❑ Elevados tiempos muertos (carga y descarga)

6.4 Ciclos de filtración

Los filtros de prensa son sistemas de deshidratación intermitente. Cada operación de prensado supone los siguientes pasos:

6.4.1 Cerramiento de la prensa

Cuando el filtro esta totalmente vacío, la cabeza movible que es activado por el sistema hidráulico-neumático cierra las placas. La presión de cerramiento es autorregulada mediante la filtración.

6.4.2 Rellenado

Durante esta fase corta la cámara se llena con lodos para su filtración. El tiempo de relleno depende del flujo de la bomba de alimentación. Para lodo con gran capacidad de filtración es mejor rellenar el filtro rápidamente para evitar la formación de una pasta en la cámara primaria antes de que se haya rellenado del todo.

6.4.3 Filtración

Una vez rellenada la cámara, la llegada de manera continua de lodo a tratar para ser desaguado provoca un aumento de la presión debido a la formación de una capa espesa de lodo en las membranas. Esta fase de filtración puede reducirse de manera manual, mediante un temporizador o un indicador del flujo que activa una alarma de parada cuando se alcanza el final de la capacidad de filtración. Cuando se ha parado la bomba de filtración, los circuitos de filtración y ductos centrales, que están todavía rellenos de lodo se les aplica aire comprimido para su purgado.

empuja la Placa de acero (E) contra las Placas de polietileno (F) haciendo la prensa. El cabezal (G) y el soporte terminal (H) son sostenidos por rieles de las Barras de soporte (I), diseñados especialmente. El filtrado pasa a través de las lonas y es dirigido hacia los canales de las placas y Puertos de drenado (J) del cabezal para descarga. Este filtrado típicamente contendrá menos de 15 ppm (mg/l) en sólidos suspendidos. La torta es fácilmente removida haciendo retroceder el pistón neumático, relajando la presión y separando cada una de las placas, para permitir que la pasta compactada caiga desde la cámara.

6.5 Capacidad de filtración

La capacidad de producción de un filtro de prensa es de entre 1.5 y 10 kg de sólidos por m^2 de superficie de filtración. Para cada modelo de filtro de prensa el volumen de la cámara y la superficie de filtración depende del número de placas del filtro. En términos prácticos el tiempo de prensado es menor de cuatro horas.

La filtración depende de:

- ❑ Espesamiento de la pasta
- ❑ Concentración de lodo
- ❑ Resistencia específica
- ❑ Coeficiente de compresibilidad.

Otra de las ventajas de los filtro prensa es que pueden aceptar lodo con distinta capacidad de filtración. Es recomendable espesar el lodo antes de la operación en el filtro de prensado. Aunque el lodo presenta gran capacidad de filtración permite capacidad de producción mayores, los filtros de prensa aceptan igualmente lodo con condiciones poco precisas para su filtrado. Esta tolerancia significa que el sistema presenta condiciones de operabilidad seguras y con pocos riesgos.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

7 COAGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

7.1 Tratamiento de aguas

El tratamiento de aguas residuales (o agua residual doméstica) incorpora procesos físicos, químicos y biológicos los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del uso humano cotidiano del agua. El objetivo del tratamiento es producir agua residual ya limpia (o efluente tratado) sustituido por descargas o reutilizables hacia el ambiente, y una basura sólida o lodos también convenientes para la futuros propósitos o reusos.

Las aguas residuales son generadas por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Esto puede ser tratado dentro del sitio en el cual es generado (por ejemplo: tanques sépticos o dentro de las mismas plantas) o recogido y llevado mediante una red de pipas y una bomba estacionaria a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para coleccionar y tratar las aguas residuales doméstica de la descarga están típicamente sujetas a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles).

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales es alcanzado por la separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas industriales , seguido por la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias indígenas flotantes. Una vez que la masa biológica es separada o removida, el agua tratada puede experimentar una desinfección adicional mediante procesos físicos o químicos. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a aun cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (tierras húmedas, cursos de golfo,

caminos verdes, etc.). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento adicional y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

Estos procesos de tratamiento son típicamente referidos a un:

- Tratamiento primario (asentamiento de sólidos)
- Tratamiento secundario (tratamiento biológico de sólidos flotantes y asentados)
- Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección)

7.2 Objetivo y definición de coagulación

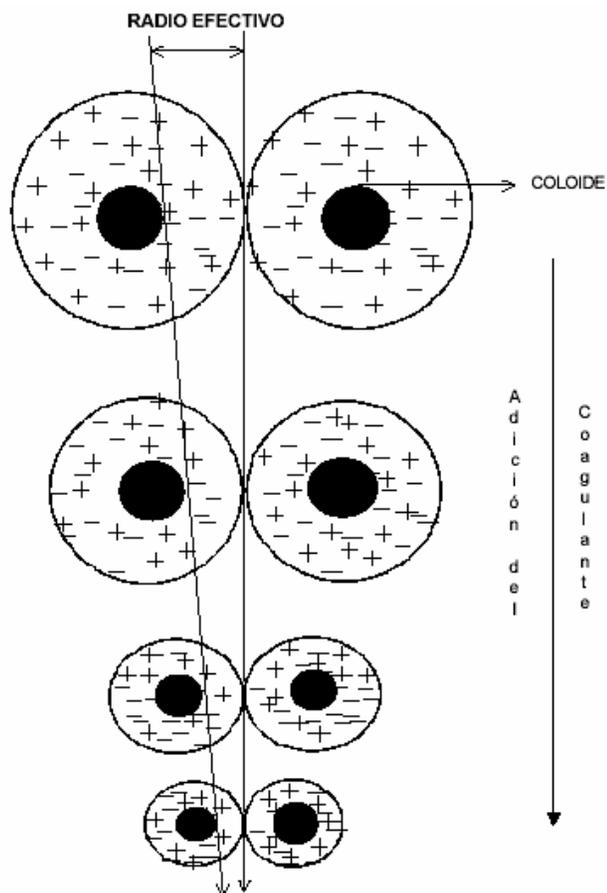
El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. En la figura 8 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. La coagulación es el tratamiento mas eficaz , pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal, porque elimina gran cantidad de sustancias de diversas naturaleza y

de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas.

Figura 8. **Coagulación**



Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

7.3 Mecanismos de la coagulación

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímico siguientes:

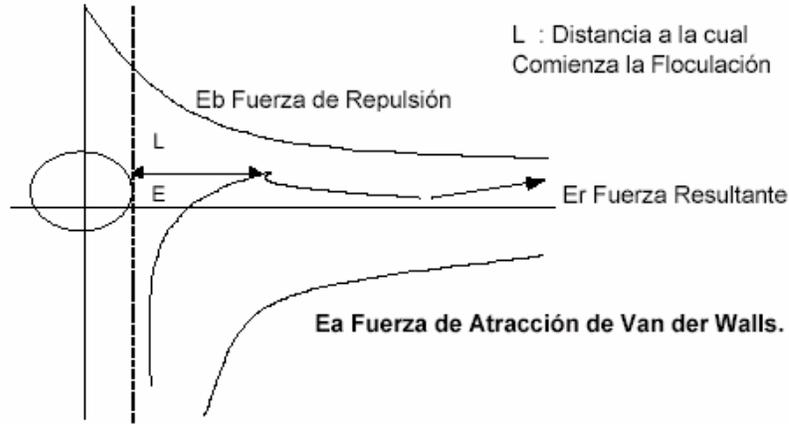
- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

7.3.1 Compresión de la Doble Capa

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. (Ver Fig. 9).

Existe por otro lado, un potencial de atracción o fuerzas de atracción E_a , entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos.

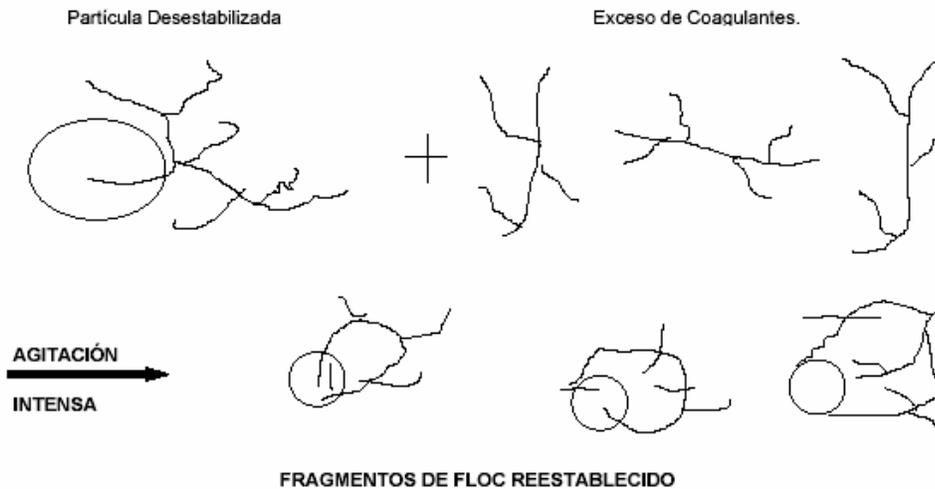
Figura 9. Fuerzas de atracción y repulsión



Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

Si la distancia que separa a las partículas es superior a "L", entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados. Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución. Ver figura 10.

Figura 10. Reestabilización de las partículas



Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

7.3.2 Adsorción y neutralización de cargas

Las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua.

Después de la teoría de la doble capa la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica.

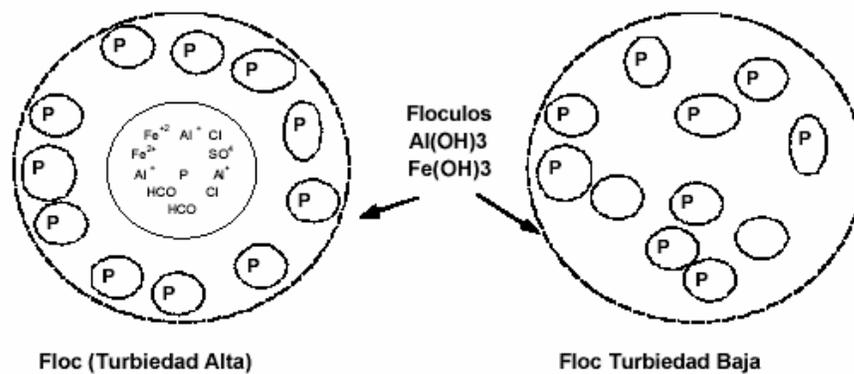
Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce a la reestabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante son absorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original.

7.3.3 Atrapamiento de partículas en un precipitado

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un flóculo, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, o Cloruro férrico FeCl_3 o el sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, el flóculo está formado de moléculas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La presencia de ciertos

aniones y de las partículas coloidales aceleran la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del flóculo; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante.

Figura 11. Atrapamiento de las partículas en un flóculo

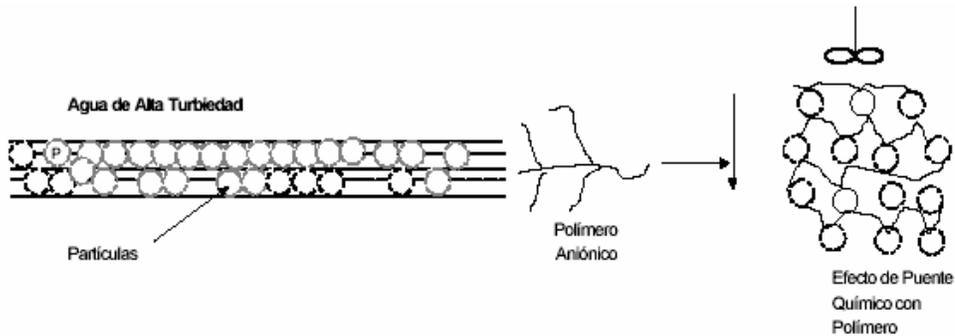


Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

7.3.4 Adsorción y Puente

En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del "puente". Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas. Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el "puente" entre las partículas coloidales. Esto puede tener una reestabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros.

Figura 12. Efecto de puente de las partículas de suspensión



Fuente. Referencia bibliográfica No. 5

7.4 Coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floculo son:

- ❑ Sulfato de Aluminio.
- ❑ Aluminato de Sodio.
- ❑ Cloruro de Aluminio.
- ❑ Cloruro Férrico.
- ❑ Sulfato Férrico.
- ❑ Sulfato Ferroso.
- ❑ Polielectrólitos (Como ayudantes de floculación).

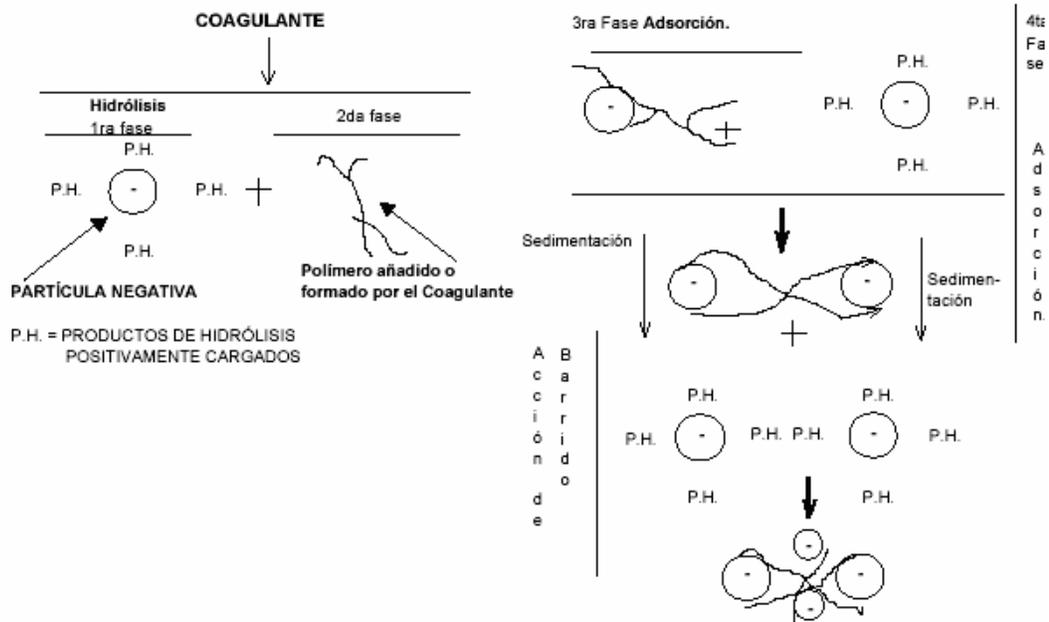
Siendo los más utilizados las sales de aluminio y de hierro; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

7.5 Etapas o fases de la coagulación

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo o muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas:

- ❑ Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- ❑ Formación de compuestos químicos poliméricos.
- ❑ Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- ❑ Adsorción mutua de coloides.
- ❑ Acción de barrido.

Figura 13. Fases de la coagulación



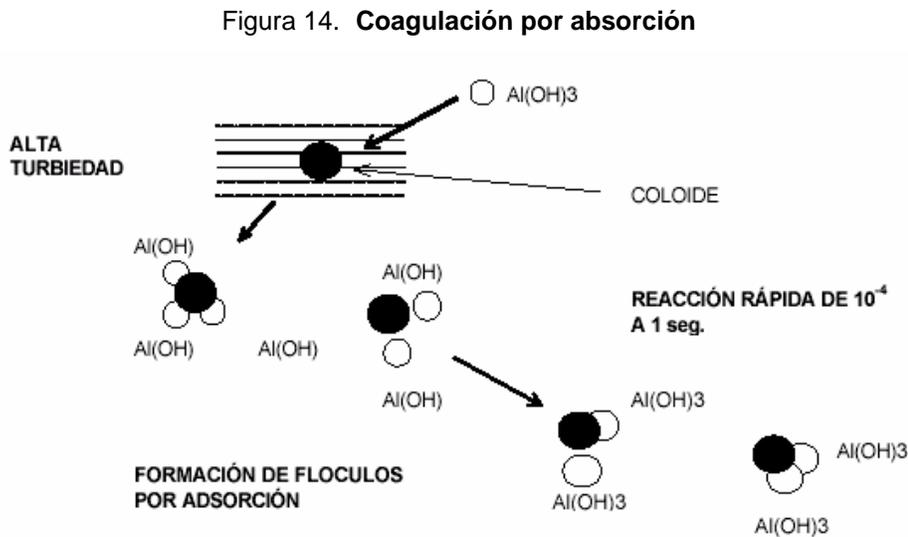
Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

7.6 Tipos de coagulación

Se presentan dos tipos básicos de coagulación: Por adsorción y por Barrido.

7.6.1 Coagulación por absorción

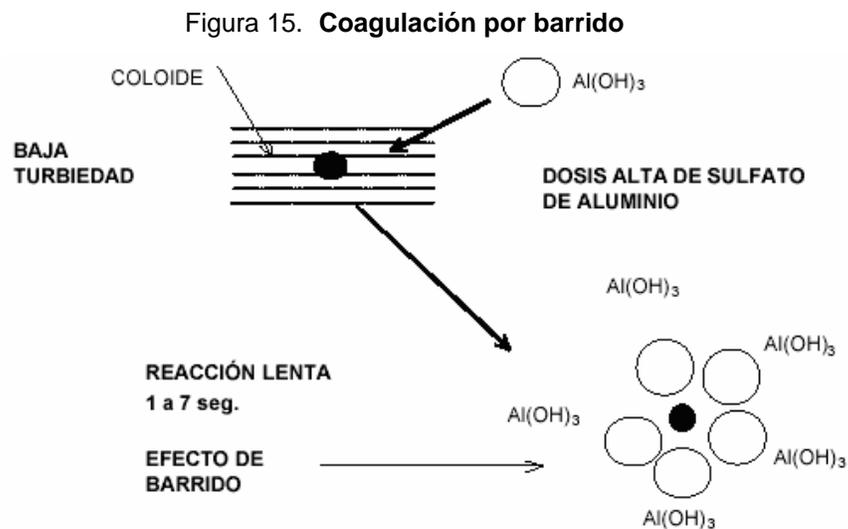
Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidos por los coloides y forman los flocúlos en forma casi instantánea.



Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

7.6.2 Coagulación por barrido

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio, sulfato férrico o cloruro férrico.



Fuente: Referencia bibliográfica No. 5

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

8 DESESTABILIZACIÓN POR Al(III) Y Fe(III) EN EL TRATAMIENTO DE AGUA Y DEL AGUA RESIDUAL

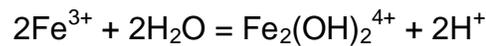
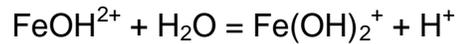
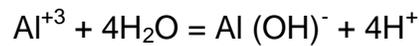
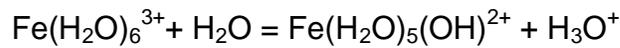
El sulfato férrico se utiliza como coagulante en aguas de desecho industrial, aguas de recirculación, aguas municipales, aguas negras, etc.

La función principal del coagulante es la de suministrar iones capaces de neutralizar efectivamente las cargas eléctricas de la mayor parte del material coloidal existente en el agua y así causar su precipitación. El valor de los coagulantes es debido, en parte, a las propiedades esponjosas del flóculo, ya que este tipo de estructura posee amplias áreas exteriores a las que se adhieren las partículas coloidales o semicoloidales. El flóculo que forma el sulfato férrico al entrar en contacto con el agua en concentraciones muy diluidas es el hidróxido férrico.

Todos los cationes metálicos están hidratados en el agua. Especies simples tales como Fe^{+3} , Al^{+3} , Ca^{+2} , y H^+ no existen en un medio acuoso natural. Aunque esta nomenclatura para los cationes es una forma abreviada aceptable en química, no describe las especies realmente presentes en el agua. Más bien, estos iones están presentes como complejos acuosos $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6^{+2}$, $\text{H}(\text{H}_2\text{O})^+$. Los iones o moléculas (tales como las moléculas de agua) que están unidos a un átomo metálico central se llaman ligandos

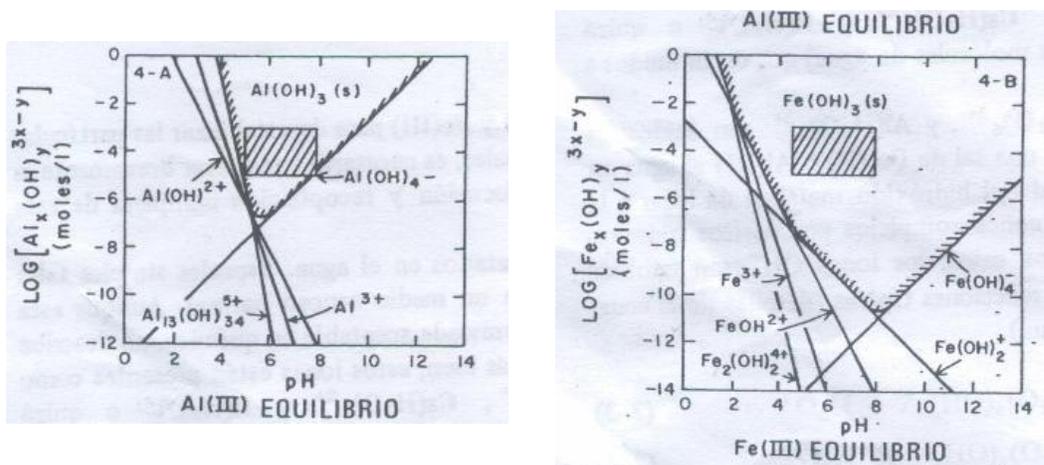
Los iones acuometálicos tales como $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ y $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$, son ácidos; es decir, son donadores de protones. La adición de una sal de Fe (III) o Al (III) al agua en concentraciones inferiores al límite de solubilidad del hidróxido

metálico da lugar a la formación de monómeros, dímeros y quizá pequeños complejos poliméricos hidroxometal, además del ion libre acuo-metal. En estos casos, los iones OH^- son también ligandos. A continuación se presentan unas pocas reacciones típicas.



Este tipo de reacciones se llaman hidrolíticas. Cuando se escriben de esta forma, resulta manifiesto el origen de la acidez de estos iones metálicos.

Figura 16. Solubilidad en el equilibrio de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (a 25°C)



Fuente: Referencia bibliográfica No. 16

La figura 16 representa las solubilidades máximas de las especies Al (III) y Fe (III) que pueden existir en equilibrio en el agua con el correspondiente hidróxido metálico precipitado a 25°C en función del pH. Las áreas rayadas corresponden a las dosificaciones aproximadas de coagulante y pH observado en la práctica del tratamiento de agua.

Cuando se añade al agua una cantidad de sal de Fe(III) o Al (III) en exceso del límite solubilidad del hidróxido metálico, ocurren una serie de reacciones hidrolíticas, desde simple hidroxocomplejos, formación de polímeros coloidales hidroxometálicos hasta la formación de un precipitado de hidróxido metálico. Estos complejos son fácilmente adsorbidos en la interfase; los iones acuometálicos no son adsorbidos. Los procesos convencionales de coagulación utilizan cantidades de Al (III) y Fe (III) que exceden del límite de solubilidad de sus hidróxidos metálicos (figura 16) Las solubilidades de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Por ejemplo, la máxima concentración total de especies solubles de Fe(III) que puede existir en equilibrio en el agua a pH 7 es aproximadamente 10^{-10} mol/litro ($5,6 \times 10^{-6}$ mg/litro). La concentración de ion acuoférrico simple ($\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$) que existe bajo estas condiciones es aún menor, siendo aproximadamente de 10^{-17} mol/litro ($5,6 \times 10^{-13}$ mg/litro). Estos hechos indican que estas especies simples solubles no contribuyen significativamente a la desestabilización de la partícula en el tratamiento del agua y agua residual.

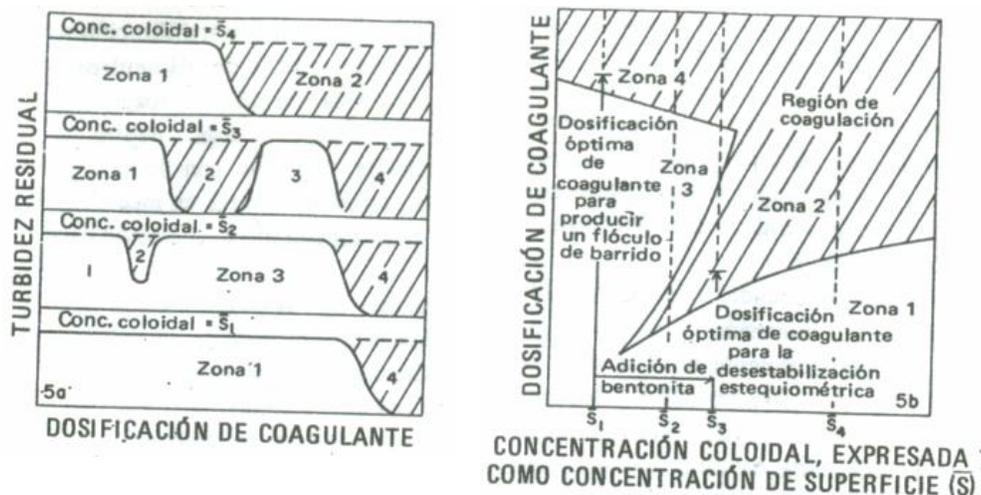
Las dosificaciones prácticas en sales de Al(III) y Fe(III) que se requieren para la desestabilización de coloides siempre exceden de la solubilidad del hidróxido metálico, así es posible considerar que la desestabilización en estos sistemas se lleva a cabo por los polímeros de Al(III) y Fe(III), los cuales son compuestos cinéticos intermedios en la precipitación eventual de un precipitado de hidróxido metálico. Estos polímeros son complejos hidroxometálicos que se adsorben sobre las partículas coloidales. La cantidad de polímero adsorbido; y

la consiguiente dosificación del coagulante de Fe(III) o Al(III) necesario para llevar a cabo la desestabilización de un coloide, pueden depender de la cantidad de coloide que está presente.

En el intervalo de pH por debajo del punto isoelectrico del hidróxido metálico, prevalecerán los polímeros cargados positivamente. La absorción de estos polímeros positivos puede desestabilizar a los coloides cargados negativamente por neutralización de carga. Por encima del punto isoelectrico, predominaran los polímeros aniónicos. La adsorción de estos materiales no puede desestabilizar a los coloides negativos por neutralización de carga. En los casos en que los polímeros inorgánicos aniónicos son coagulante efectivos, estos pueden actuar por adsorción o formación de enlaces de puente.

Si la adsorción es importante, debemos esperar que la coagulación con polímeros de Fe(III) o Al(III) exhiba reestabilización (sobredosificación) y estequiometría.

Figura 17. Representación esquemática de la coagulación observada en las pruebas de jarras utilizando sales aluminio (III) y hierro (III) a un pH constante



Fuente: Referencia bibliográfica No. 16

La figura 17 presenta las curvas esquemáticas de turbidez residual en función de la dosificación de coagulante a pH constante para aguas naturales tratadas con sales de Fe(III) o Al(III). Se presentan cuatro curvas, cada una de ellas corresponde a un agua con una concentración distinta de materia coloidal.

Cada una de estas curvas esquemáticas de coagulación está subdividida en cuatro zonas. En la zona 1, que corresponde a dosificaciones bajas, se ha añadido insuficiente coagulante para llevar a cabo la desestabilización. El aumento de la dosificación de coagulante produce la desestabilización y permite la agregación rápida (zona 2). Un posterior incremento de la dosificación puede reestabilizar las dispersiones en algunos niveles de pH (zona 3). En la zona 4 existe un grado de sobresaturación suficiente como para producir una precipitación rápida de una gran cantidad de hidróxido aluminico o férrico, dentro de la cual se sumergen las partículas coloidales constituyendo lo que se ha llamado un flóculo de barrido.

La figura 17 es una representación esquemática de las interrelaciones entre la dosificación de coagulante y la concentración coloidal (m^2/litro) a pH constante. Para concentraciones coloidales bajas (S_1 en la figura 17), la coagulación requiere la producción de un exceso grande de precipitado de hidróxido amorfo. Para sistemas que contengan una baja concentración de coloide, se ha propuesto que existen insuficientes oportunidades de contacto para producir agregados o desestabilizar completamente a las partículas en un tiempo de permanencia razonable. Estas condiciones pueden darse en muchas plantas de tratamiento del agua cuando la turbidez del agua bruta es baja.

Para concentraciones coloidales mayores (S_2 y S_3 en figura 17), se requiere una dosificación de coagulante menor que para la coagulación que implica la precipitación del hidróxido metálico. En esta región, un aumento de la

concentración coloidal requiere un aumento en la dosificación del coagulante, es decir, se ha observado una coagulación estequiométrica. La zona de desestabilización (zona 2) se observa que se extiende al aumentar la concentración coloidal (curva S_2 y S_3 en la figura 17).

Para concentraciones coloidales altas, del orden de magnitud encontrado en el condicionamiento de fango de las plantas de tratamiento de agua residual, se requiere una dosificación de coagulante mayor para desestabilizar al coloide (S_4 en figura 17). En estas circunstancias, la dosificación de coagulante (polímero metálico) que se requiere para la desestabilización puede igualar o superar al requerido para la coagulación del tipo flóculo de barrido en las suspensiones diluidas.

La dosificación química requerida depende de cómo se alcance la desestabilización. Elevadas dosificaciones de coagulante se requieren para producir un precipitado voluminoso de hidróxido; la dosificación requerida tiende a disminuir a medida que la concentración coloidal aumenta. La desestabilización por absorción generalmente requiere una dosificación menor de coagulante; la dosificación requerida aumenta al aumentar la concentración coloidal. La desestabilización por adsorción puede requerir tiempos de reacción más largos (tiempos de permanencia) para producir la agregación cuando la concentración coloidal es baja; esto puede contrarrestar la ventaja de una dosificación menor. Para estas y otras situaciones en que están presentes pequeñas concentraciones de materiales coloidales no deseados, puede resultar eficaz las dosificaciones elevadas de coagulante que produce un precipitado gelatinoso de hidróxido metálico.

La desestabilización producida por los polímeros obtenidos a partir de las sales de Al (III) y Fe(III) está influenciada por tres factores; dosificación del

coagulante, pH y concentración coloidal. Se ha visto que la dosificación del coagulante preciso para desestabilización en una función de la concentración del coloide que debe agregarse. Las características de los polímeros que se forman en un sistema como tal están afectadas por el grado de sobresaturación (dosificación del coagulante y pH) en el sistema. Por ejemplo se ha observado que los polímeros inorgánicos cargados positivamente se formarán para valores de pH inferiores al punto isoeléctrico del hidróxido metálico ($\text{Al}(\text{OH})_3$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Cuando el pH disminuye por debajo del punto isoeléctrico, la carga positiva promedio de las especies metálicas tiende a aumentar, creciendo, por tanto, la desestabilización por neutralización de carga y la posibilidad de reestabilización por sobredosificación.

Las sales de Al(III) y Fe(III) son ácidas. La adición de estos compuestos químicos al agua es similar a una titulación ácida del agua. Como resultado, el pH del sistema después de la adición de estos coagulantes, dependerá de la dosificación de coagulante y la alcalinidad (capacidad tampón) del agua o agua residual.

El conocimiento de las correlaciones entre dosificación óptima de coagulante, pH y concentración coloidal, combinado con una comprensión de los dos modos de desestabilización que pueden producirse por sales de Al(III) y Fe(III), puede ser útil y aun necesario en la operación de un proceso de coagulación. Se pueden describir cuatro tipos de suspensiones

- Concentración coloidal alta, alcalinidad baja. Este es el sistema más fácil de tratar, ya que sólo debemos determinar un parámetro químico (la dosificación óptima de coagulante). La desestabilización se lleva a cabo por absorción de los polímeros hidroxometálicos positivamente cargados;

éstos se producen en niveles ácidos de pH (pH 4 a 6, según el coagulante).

- Concentración coloidal alta, alcalinidad alta. La desestabilización se alcanza por adsorción y neutralización de carga para niveles de pH neutros y ácidos. Se puede elegir el uso de una dosificación alta de coagulante (debido a la elevada alcalinidad, el pH permanecerá generalmente en la región neutra, en donde los polímeros hidroxometálicos no están altamente cargados con lo cual la neutralización de carga es más difícil). Alternativamente es posible invertir en medios de elutriación, para eliminar la alcalinidad por lavado, y desestabilizar con una dosificación baja de coagulante a un pH bajo.
- Concentración coloidal baja, alcalinidad alta. La coagulación se lleva a cabo por inmersión de las partículas coloidales en el flóculo de barrido con dosificaciones relativamente altas de coagulante. Se puede añadir una ayuda de coagulante para aumentar la concentración coloidal y aumentar la velocidad de contacto interpartícula.
- Concentración coloidal baja, alcalinidad baja. Es la más difícil. La coagulación será ineficaz si solamente se utilizan sales de Al(III) y Fe(III), ya que el pH será rebajado demasiado, con el fin de permitir la formación de flóculo de barrido y la velocidad de contactos entre partículas será posiblemente demasiado lenta para llevar a cabo una desestabilización por neutralización de carga. Para una coagulación eficaz, debemos añadir alcalinidad, partículas coloidales o ambos a la vez.

9 ESTÁNDAR DE LA AWWA PARA SULFATO FÉRRICO LÍQUIDO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS (AWWA B406)

9.1 Manufactura del sulfato férrico para el tratamiento de aguas

El sulfato férrico es usado como coagulante inorgánico para remoción de partículas coloidales y suspendidas del agua por coagulación y floculación. Este es preparado por oxidación del sulfato ferroso o por disolución de óxido férrico en ácido sulfúrico. El sulfato férrico está disponible en la forma seca como un polvo granular, de color gris blanco y rojo gris, o como una solución estable que es relativamente clara y de color rojo marrón. El término sulfato férrico como se usa aquí se refiere a la manufactura del producto sulfato férrico, un sulfato férrico seco parcialmente hidratado teniendo la fórmula básica $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot X\text{H}_2\text{O}$ en el cual X representa en promedio aproximadamente 4.5 y conteniendo aproximadamente 20% de hierro férrico soluble en agua. Este sulfato férrico se disuelve rápidamente en agua, como contrasta con el sulfato férrico anhidro, el cual se disuelve muy ligeramente en agua. Similarmente, en este estándar, el término sulfato férrico líquido se refiere a una solución de sulfato férrico conteniendo alrededor de 50% en peso, del sulfato férrico en la forma seca como se definió en este estándar. Este porcentaje puede variar de acuerdo al arreglo entre el suministrador y el comprador.

Debido a la corrosividad de cloruros en algunos materiales, esta edición de la AWWA B406 incluye una limitación en la impureza de cloro de 10 ppm de Cl por 1% del contenido de hierro férrico. Esta limitación se basa en un examen estático de corrosión usando un 50% de sulfato férrico líquido conteniendo hasta 1000 ppm de Cl manteniendo a 100 °F (38°C), en el cual no se corroe el acero inoxidable 316 o 304, mantenido durante 21 días de contacto. El acero

templado como un control, sin embargo, es consumido en varios días, a pesar de la presencia o ausencia de cloro. Ya que tal solución de sulfato férrico caliente conteniendo cloruros puede incrementar la corrosividad o extracción de las impurezas metálicas cuando es conducido, almacenado, o usado como producto a temperaturas superiores a 100 °F (38°C), el comprador puede discutir el nivel de cloruros, temperatura y potencial de corrosividad con el suministrador, particularmente si se excede ésta temperatura.

9.2 Consideraciones de almacenamiento y manejo del sulfato férrico

El sulfato férrico es levemente higroscópico y debe, de hecho, ser almacenado en lugares secos. Cuando se alimenta sulfato férrico, la razón de agua correcta debe ser mantenida. Las direcciones del equipo de alimentación de los fabricantes para alimentar el sulfato férrico deben de ser seguidas.

El sulfato férrico líquido puede ser almacenado en tanques resistentes a la corrosión y alimentados dentro del agua con un equipo apropiado para su alimentación. Mientras el sulfato férrico líquido se mantiene como un licor estable por al menos 72 horas a -0.4 °F (-18 °C) sin congelar o cristalizar, con solamente un exceso ligero en la viscosidad, es recomendado que los tanques sean bien aislados o calentados si se prolonga el período de temperatura debajo de 32 °F (0 °C).

La exposición humana a ambos, sulfato férrico líquido o seco, puede ser minimizado por una buena ventilación, ropa protectora, limpieza o aseo normal del personal, y buenas prácticas de manejo. El personal de manejo del sulfato férrico seco debe llevar gafas, mascarilla de polvos, guantes, y otra ropa protectora. Los que manejan el sulfato férrico líquido deben llevar gafas, guantes, y una gabacha resistente al ácido. Deben evitarse la salpicadura y la

niebla o bruma del líquido. Un respirador teniendo un filtro apropiado de carbón activado para ácido sulfúrico débil debe ser llevado cuando se maneja sulfato férrico líquido.

9.3 Requerimientos del sulfato férrico líquido

9.3.1 Requerimientos físicos

El sulfato férrico líquido debe estar libre de material extraño y debe ser transportado y entregado a tal concentración y temperatura que no ocurra congelamiento o cristalización. El líquido debe ser apropiado para alimentarse por medio de bombas y otros dispositivos contruídos de materiales resistentes a la corrosión.

9.3.2 Requerimientos químicos

9.3.2.1 Hierro férrico

El sulfato férrico debe contener no menos que 18 % de hierro férrico soluble en agua (Fe^{+3}) y el sulfato férrico líquido debe contener no menos que 9% del hierro férrico soluble en agua (Fe^{+3}), excepto por los arreglos entre el suministrador y el comprador

9.3.2.2 Hierro ferroso

En el sulfato férrico seco el hierro ferroso (Fe^{+2}) soluble en agua no debe exceder de 3%, mientras que en el sulfato férrico líquido, éste no debe de exceder el 1.5% con base en 9% de hierro férrico.

9.3.2.3 Material insoluble en agua

No más que 6.5% del sulfato férrico debe ser insoluble en agua y no más que 0.1% debe ser insoluble en el sulfato férrico líquido.

9.3.2.4 Ácido libre

El sulfato férrico debe contener ácido libre, pero este no debe exceder 4.5% como H_2SO_4 . El sulfato férrico líquido debe contener suficiente ácido como H_2SO_4 para que la solución tenga un pH de 2 o menos, para asegurar un producto estable.

9.3.2.5 Cloruros

No más de 10 ppm de cloro debe estar presente por cada 1% de hierro férrico contenido a 100°F (38°C).

10 TOXICIDAD DEL ALUMINIO Y SU USO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

10.1 Toxicidad del aluminio y su relación con la actividad cerebral

Debido a la abundancia natural del Al y a su creciente utilización en la industria y en la vida moderna, es prácticamente improbable no encontrar trazas de Al en alguna célula de un ser vivo. Hasta ahora, no se ha demostrado un rol fisiológico para el metal, por lo que su presencia en el organismo constituye un riesgo de toxicidad.

La biodisponibilidad del metal y, en consecuencia, su toxicidad, se ven influenciadas por la identidad química de la especie reactiva (dependiente del pH del medio) y por la capacidad de otros ligandos para interferir en la esfera de hidratación del ion metálico. El pH fisiológico del entorno celular de los mamíferos oscila levemente alrededor de 7,4. Por lo tanto, los conceptos de biodisponibilidad y toxicidad potencial del Al sólo tienen sentido a la luz del conocimiento del comportamiento químico del metal en soluciones acuosas neutras.

En el medio extracelular, el Al forma complejos con especies de bajo peso molecular que poseen átomos de oxígeno donantes de electrones, entre ellas, citrato, hidróxido, fosfato, ADP y ATP. Estos ligandos mantienen en estado soluble al catión en suficiente cantidad y por el tiempo necesario para producir una respuesta tóxica, a nivel celular primero y en todo el organismo luego.

Si bien la toxicidad del Al ha sido bien documentada, los mecanismos por los cuales actúa todavía no han sido totalmente esclarecidos. Se han

demostrado acciones perjudiciales del catión en sistemas celulares y sobre distintos órganos tales como cerebro, hígado, hueso, músculo esquelético, corazón y médula ósea.

Actualmente, se considera que el cerebro constituye un sitio importante de acumulación de Al, independientemente de la vía por la cual el mismo ingresa al organismo. Diversas manifestaciones neurológicas en el ser humano han sido atribuidas a la intoxicación por Al: pérdida de la memoria, temblores, depresión de la movilidad motora, pérdida de la curiosidad, ataxia y convulsiones generalizadas con estado epiléptico. Por esta razón, el Al es considerado un elemento neurotóxico. En niños pequeños, la neurotoxicidad se manifiesta por regresión de las aptitudes verbales y motoras.

Numerosos estudios epidemiológicos y experimentales han sugerido una posible conexión entre la neurotoxicidad producida por Al y la patogénesis de la enfermedad de Alzheimer. Aunque esta relación todavía es motivo de controversia, no se puede ignorar la participación de la intoxicación aluminica en el desarrollo de severas manifestaciones neurológicas.

En el caso particular de los seres humanos, dado el extraordinario incremento del uso del Al, es de esperar que la exposición al metal aumente a medida que se eleva el promedio de vida de la población. Debido a la creciente biodisponibilidad del metal y a sus efectos sobre los seres vivos, surge la necesidad de investigar los mecanismos por los cuales el Al es incorporado a diferentes células, modificando su metabolismo y morfología, así como también determinar cuáles son las especies del catión involucradas en tal es acciones. Los estudios podrían revelar, en los próximos años, importantes interacciones de este elemento no esencial para el organismo con mecanismos de organización y funcionamiento celular, permitiendo así conformar un panorama

más completo de la actividad del Al en los seres vivos. Mientras tanto, conviene evitar o disminuir al mínimo la exposición al metal.

10.2 Uso del sulfato de aluminio en el tratamiento de agua

En todos los países, el agua que circula por las cañerías recibe un tratamiento para purificarla y hacerla potable antes que llegue a los consumidores. En la mayoría de las ciudades de los países desarrollados se utiliza para este fin el sulfato de aluminio. Cuando se sabía poco sobre los posibles efectos secundarios del sulfato de aluminio, se consideraba que el agua estaba correctamente potabilizada cuando contenía unos 200 microgramos por litro. Para entonces, ya se había observado que el sulfato de aluminio provocaba algunos desajustes intestinales a personas especialmente sensibles, pero no se le dio mucha importancia, pues eran casos excepcionales. Sin embargo, cuando el mal de Alzheimer empezó a afectar a porcentajes crecientes de personas de más de 55 años y las investigaciones médicas encontraron un inesperado vínculo entre la enfermedad y el aluminio. Las autoridades sanitarias prohibieron que el agua potable contuviese cantidades superiores a los 50 microgramos por litro. Pero con esta dosis el agua pierde potabilidad, pierde limpieza y se puede volver peligrosa para la salud. Las autoridades sanitarias internacionales se encuentran así ante una grave disyuntiva. Siendo la más rápida y segura solución la utilización de otro coagulante, que presentase menores riesgos para la salud física y mental de los consumidores.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

11 IMPACTO AMBIENTAL

11.1 Efectos en la salud provocados por los reactivos de lixiviación empleados en la producción de sulfato férrico

Los efectos en la salud debido al uso de reactivos de lixiviación, como el ácido sulfúrico han sido documentados mediante pruebas de laboratorio de la casa de donde proviene el producto en cuestión (ficha técnica del producto, ver anexo III). La ejecución de estas pruebas condujo al desarrollo de los límites de exposición, tales como los valores iniciales límites y los niveles de exposición en períodos cortos y su propósito es establecer los límites de concentración a los que los trabajadores pueden ser expuestos.

La trasgresión de dichos límites de exposición podría causar trastornos en la salud de los trabajadores, tales como irritación de la piel y pulmones, o la formación de acumulaciones en los tejidos del cuerpo.

El uso y el manejo responsable de los reactivos de lixiviación puede ser puesto en práctica mediante el uso de ropa de trabajo y controles técnicos apropiados, tales como las cubiertas de descarga y el aislamiento del proceso. Se deberá seleccionar el equipo teniendo como base el tipo de exposición.

Con el fin de asegurar que los efectos en la salud del trabajador sean mínimos, se deben desarrollar e implementar programas de capacitación en los que se exponga en forma resumida, al personal, los potenciales efectos dañinos en la salud, causado por los reactivos en uso en las operaciones.

El área en la que los trabajadores se encuentran expuestos a los agentes de lixiviación es el área de preparación de reactivos. En estos lugares los

reactivos se encuentran en bruto y en altas concentraciones, por lo que es más probable que causen efectos nocivos para la salud. Se deberán desarrollar procedimientos operativos que influyan en el manejo de reactivos en bruto. La implementación de estos procedimientos operativos deberá darse preferentemente bajo la forma de capacitación.

En el caso de los reactivos de la lixiviación de hematita, los riesgos de incendio y explosión para las mezclas y concentraciones diluidas (tanques de servicio) son mínimos siempre que se sigan los procedimientos adecuados de almacenamiento, prevención de derrames y primeros auxilios. Se capacitará al personal y se le mantendrá actualizado sobre la correcta implementación de los procedimientos.

11.2 Efectos ambientales provocados por los reactivos de lixiviación empleados en la producción de sulfato férrico

El impacto ambiental de los derrames de reactivos es mínimo, si se toman en consideración los procedimientos adecuados de prevención de derrames y almacenamiento. Sin embargo, el impacto ambiental más grave que podría producirse en el caso de una descarga descontrolada de reactivos será que éstos entren en contacto con ríos, arroyos o lagos adyacentes. En un caso como este el reactivo podría ser tóxico para la vida acuática. Los usuarios que utilicen el agua en áreas cercanas a la planta de procesamiento (agua para riego y potable) también podrían verse negativamente afectados por estos elementos.

También pueden registrarse daños en otros elementos constitutivos del ambiente, como los suelos, el agua freática y la vegetación. Las descargas descontroladas en el suelo no presentan un daño grave; sin embargo, de no

procederse a la limpieza o a controlar dichas descargas la responsabilidad ambiental es mayor, sobre todo si la vegetación o el agua subterránea se ve afectada. Más aún, las reiteradas descargas sin control hacia la capa freática pueden originar efectos costosos y difíciles de remediar en el largo plazo. Algunos de los reactivos de lixiviación como el ácido sulfúrico se caracterizan por su alta o parcial volatilidad, por lo que, pueden representar un peligro sustancial en términos de emisiones atmosféricas.

Cada planta debe contar con un plan específico de prevención de derrames y de respuesta en caso de emergencias, el cual será de gran utilidad para comprobar y establecer la idoneidad de las instalaciones del almacenamiento y contención de derrames con que se cuenta para asegurar la protección ambiental, especialmente en el área de preparación de reactivos.

11.3 El déficit mundial del tratamiento de aguas

Visto de una perspectiva mundial existe capacidad inadecuada del tratamiento de las aguas residuales, especialmente en países poco desarrollados. Esta circunstancia ha existido desde, por lo menos, los años 70 y es debido a la superpoblación, a la crisis del agua y al costo de construir sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El resultado del tratamiento inadecuado de las aguas residuales es aumentos significativos de la mortalidad (sobre todo) de enfermedades prevenibles; por otra parte, este impacto de la mortalidad es particularmente alto entre los infantes y otros niños en países subdesarrollados, particularmente en los continentes de África y de Asia.

Particularmente, en el año 2000, los Naciones Unidas han establecido que 2.64 mil millones personas tenían el tratamiento y/o disposición de las aguas residuales inadecuado. Este valor representó a 44 por ciento de la población global, pero en África y Asia aproximadamente la mitad de la población no tenía ningún acceso cualesquiera a los servicios del tratamiento de aguas residuales.

12 METODOLOGÍA

12.1 Recursos humanos

- Asesor Ing. Mariano Eskenazy
- Responsables del Proyecto:
 - Mónica Saraí Soto Pivaral
 - Ginger Kim Elinor Starlight Méndez Marroquín

12.2 Infraestructura

- Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para la realización de la práctica experimental.
- Laboratorio de Química Inorgánica y Orgánica de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para las pruebas de laboratorio (pH, densidad).
- Laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para las pruebas de fluorescencia de rayos X para las muestras de sulfato férrico
- Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso, S.A., para la evaluación química de las arcillas.

12.3 Obtención de muestras

El material de hematita para la realización de la práctica experimental se obtuvo de la Mina "Quebrada María", ubicada en Camotán, Chiquimula, mediante la empresa "Geo-Minas" (Ver información en capítulo 1).

12.4 Condiciones de operación

12.4.1 Fijas

12.4.1.1 Relaciones de lixiviación

Tabla II. Relaciones de lixiviación

| | |
|--|------|
| Relación de lixiviación respecto a la Hematita (g de hematita/ml de H_2SO_4 (98%)) | 2.62 |
| Relación de lixiviación respecto a la Hematita (g de hematita/ml de H_2SO_4 (solución al 20%)) | 0.53 |
| Relación de lixiviación respecto a la Hematita (g de hematita/ml de H_2SO_4 (solución al 25%)) | 0.67 |
| Relación de lixiviación respecto a la Hematita (g de hematita/ml de H_2SO_4 (solución al 30%)) | 0.80 |

Fuente: Muestra de cálculo, sección 12.6.2

12.4.1.2 Condiciones de operación fijas por equipo

12.4.1.2.1 Tamizador

Tabla III. Condiciones de operación fijas del tamizador

| | |
|--|--|
| Mesh (tamaño de partícula) de Hematita | 140 (106 μm) - 200 (75 μm) |
|--|--|

Fuente: Referencia bibliográfica No. 3 y laboratorio de operaciones unitarias, USAC

12.4.1.2.2 Sistema de agitación

Tabla IV. Condiciones de operación fijas del sistema de agitación

| | |
|---------------------------------|----------|
| Angulo de agitador | 0° |
| Velocidad Promedio del agitador | 1000 rpm |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

12.4.1.2.3 Reactor

Tabla V. Condiciones de operación fijas del reactor

| | |
|---|---------|
| Tamaño de lote (Hematita) (g) | 3700 |
| Cantidad de Fe_2O_3 (g) | 1382.69 |
| Cantidad de Fe(III) (g) | 967.10 |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC y muestra de cálculo, sección 12.6.1

12.4.2 Variables

12.4.2.1 Concentraciones y cantidades de reactivos

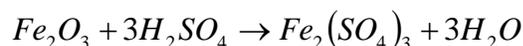
Tabla VI. Concentraciones y cantidades de reactivos

| Concentración de ácido (% Volumen) | Peso de hematita (g) | Cantidad de Fe_2O_3 (g) | Volumen de ácido (ml) |
|------------------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|
| 98 | 3700 | 1382.69 | 1412.79 |
| 30 | 3700 | 1382.69 | 4615.12 |
| 25 | 3700 | 1382.69 | 5538.14 |
| 20 | 3700 | 1382.69 | 6922.67 |

Fuente: Muestra de cálculo, sección 12.6.3

Estas consideraciones de operación se utilizaron, dadas las restricciones del equipo y especificaciones para la recuperación de sulfato de hierro.

12.5 Reacción química



12.6 Muestra de cálculo

12.6.1 Cálculo de cantidad teórica de $H_2SO_{4(98\%)}$ respecto al tamaño de lote

$$3700g \text{ _Hematita} * \frac{0.3737g \text{ _}Fe_2O_3}{1g \text{ _Hematita}} * \frac{1mol \text{ _}Fe_2O_3}{159.7g \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{3mol \text{ _}H_2SO_4}{1mol \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{98.08g \text{ _}H_2SO_4}{1mol \text{ _}H_2SO_4}$$

$$* \frac{100g \text{ _}H_2SO_{498\%}}{98g \text{ _}H_2SO_{4100\%}} * \frac{1ml \text{ _}H_2SO_{498\%}}{1.84g \text{ _}H_2SO_{498\%}} = 1412.79ml \text{ _}H_2SO_{498\%}$$

12.6.2 Cálculo de las constantes de lixiviación

Ejemplo:

$$Rel.Lixiviacion = \frac{3700g \text{ _Hematita}}{1412.79ml \text{ _}H_2SO_{498\%}} = 2.62g \text{ _Hematita/ml \text{ _}H_2SO_{498\%}}$$

De esta forma se efectúa para cada caso.

12.6.3 Determinación del volumen mínimo de solución con base en los requerimientos de la solución de sulfato férrico y los límites de operación del filtro prensa (más del 9% de hierro (III) en solución, 2228g de arcillas)

- **Determinación del sulfato férrico, de acuerdo a la relación estequiométrica:**

$$3700g_{\text{ Hematita}} * \frac{0.3737g_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}}{1g_{\text{ Hematita}}} * \frac{1mol_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}}{159.7g_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}} * \frac{1mol_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}}{1mol_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}} * \frac{399.874g_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}}{1mol_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}}$$

$$= 3462.13g_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}$$

- **Determinación de hierro presente en la solución de sulfato férrico, de acuerdo a la relación estequiométrica:**

$$3700g_{\text{ Hematita}} * \frac{0.3737g_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}}{1g_{\text{ Hematita}}} * \frac{1mol_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}}{159.7g_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}} * \frac{1mol_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}}{1mol_{\text{ Fe}_2\text{O}_3}} * \frac{2mol_{\text{ Fe}^{+3}}}{1mol_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}}$$

$$* \frac{55.85g_{\text{ Fe}^{+3}}}{1mol_{\text{ Fe}^{+3}}} = 967.10g_{\text{ Fe}^{+3}}$$

Entonces, el valor porcentual máximo de recuperación de Fe^{+3} es:

Ecuación No. 1

$$\%_{\text{ Fe}^{+3} \text{ en solución}} = \frac{g_{\text{ Fe}^{+3}}}{g_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3 \text{ solución}}}$$

$$\text{Rel. porcentual} = \frac{967.10g_{\text{ Fe}^{+3}}}{3462.13g_{\text{ Fe}_2(SO_4)_3}} = 27.93\% \text{ de } \text{ Fe}^{+3} / \text{ Solución de } \text{ Fe}_2(SO_4)_3$$

- **Por lo tanto, ya que el porcentaje mínimo es 9% de Fe^{+3} , se determinará a continuación el volumen mínimo de solución de ácido sulfúrico para ese porcentaje:**

Ejemplo:

(Determinación del volumen de ácido al 75 %, según la ecuación M.2)

Ecuación No. 2

$$V_2 = \frac{C_1 V_1}{C_2}$$

Fuente: Fuente bibliográfica No. 5

Donde:

V_1, V_2 = Volumen de soluciones.

C_1, C_2 = Concentración de soluciones.

1412.49= Volumen teórico de $H_2SO_{4(98\%)}$ respecto a 3700g hematita utilizada.

$$V_2 = \frac{(1412.49)(98\%)}{75\%} = 1846.05ml \text{ } H_2SO_{475\%}$$

De esta forma se efectúa para cada concentración de ácido.

- **A partir de este valor, se calculó la cantidad de agua de dilución, con base en la ecuación No. 3:**

Cálculo para un volumen de ácido sulfúrico al 75%:

Ecuación No. 3

$$mlH_2O_{en_solución} = mlH_2SO_{4X\%} - mlH_2SO_{498\%}$$
$$mlH_2O_{en_solución} = (1846.05 - 1412.79)mlH_2SO_4 = 433.26ml$$

Tomando que la densidad del agua a condiciones estándar de operación es 1g/ml, entonces:

$$g_{H_2O_{en_solución}} = 433.26ml_{H_2O_{en_solución}} = 433.26g_{H_2O_{en_solución}}$$

□ **Determinación de peso total de sulfato de hierro diluido obtenido:**

Ecuación No. 4

$$g_{Fe_2(SO_4)_3} = g_{Fe_2(SO_4)_3_{100\%}} + g_{H_2O_{en_solución}}$$

Cálculo para un volumen de ácido sulfúrico al 75%:

$$g_{Fe_2(SO_4)_3_{en_solución}} = 3462.13g_{Fe_2(SO_4)_3} + 433.26g_{H_2O}$$

$$g_{Fe_2(SO_4)_3_{en_solución}} = 3895.38g_{Fe_2(SO_4)_3_{Soluc.}}$$

□ **Determinación del porcentaje en peso de hierro (III) en función de las distintas concentraciones de ácido sulfúrico:**

Según ecuación No 1:

$$\%_{Fe^{+3}_{solución}} = \frac{967.10g_{Fe^{+3}}}{3895.38g_{Fe_2(SO_4)_3_{Soluc.}}} = 24.83\% \text{ de } Fe^{+3} / Solución \text{ de } Fe_2(SO_4)_3$$

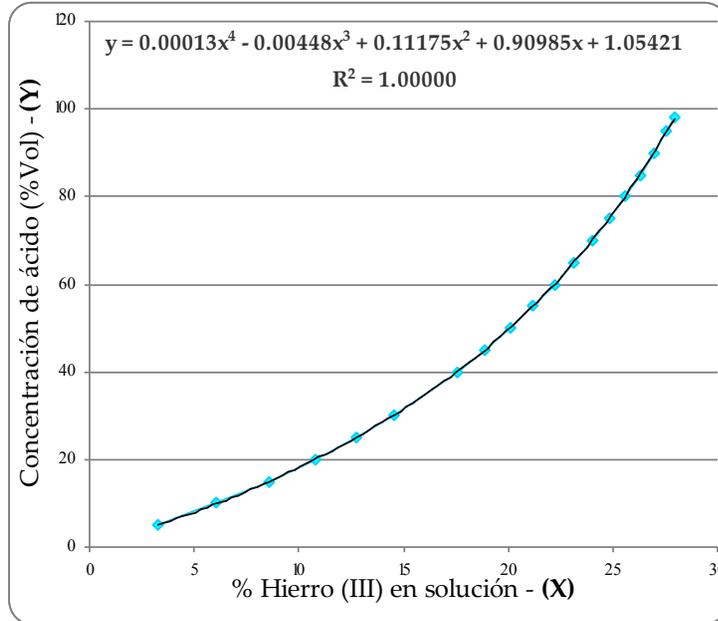
A continuación se presenta una tabla resumen indicando todos los datos intermedios obtenidos para la determinación de las concentraciones de operación, con base en los requerimientos de la solución de sulfato de hierro y los límites de operación del filtro prensa (9% de hierro (III) mínimo en solución, 2228g de arcillas):

Tabla VII. Tabulación de relación proporcional de porcentaje de Fe(III) extractable , en función de la concentración de ácido sulfúrico, para un lote de 3700g de hematita a temperatura ambiente

| Concentración de ácido (% Volumen) (Y) | Volumen ácido (ml) | Agua en solución (g) | Solución de Sulfato de hierro (g) | Hierro (III) (g) | % Hierro (III) en solución (peso/peso) (X) |
|--|--------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|--|
| 98 | 1412.79 | 0 | 3462.13 | 967.10 | 27.93 |
| 95 | 1457.40 | 44.61 | 3506.74 | 967.10 | 27.58 |
| 90 | 1538.37 | 125.58 | 3587.71 | 967.10 | 26.96 |
| 85 | 1628.86 | 216.07 | 3678.20 | 967.10 | 26.29 |
| 80 | 1730.67 | 317.88 | 3780.01 | 967.10 | 25.58 |
| 75 | 1846.05 | 433.26 | 3895.38 | 967.10 | 24.83 |
| 70 | 1977.91 | 565.12 | 4027.24 | 967.10 | 24.01 |
| 65 | 2130.05 | 717.26 | 4179.39 | 967.10 | 23.14 |
| 60 | 2307.56 | 894.77 | 4356.89 | 967.10 | 22.20 |
| 55 | 2517.34 | 1104.55 | 4566.67 | 967.10 | 21.18 |
| 50 | 2769.07 | 1356.28 | 4818.41 | 967.10 | 20.07 |
| 45 | 3076.74 | 1663.95 | 5126.08 | 967.10 | 18.87 |
| 40 | 3461.34 | 2048.55 | 5510.67 | 967.10 | 17.55 |
| 30 | 4615.12 | 3202.32 | 6664.45 | 967.10 | 14.51 |
| 25 | 5538.14 | 4125.35 | 7587.48 | 967.10 | 12.75 |
| 20 | 6922.67 | 5509.88 | 8972.01 | 967.10 | 10.78 |
| 15 | 9230.23 | 7817.44 | 11279.57 | 967.10 | 8.57 |
| 10 | 13845.35 | 12432.56 | 15894.68 | 967.10 | 6.08 |
| 5 | 27690.69 | 26277.90 | 29740.03 | 967.10 | 3.25 |
| 1 | 138453.45 | 137040.66 | 140502.79 | 967.10 | 0.69 |

Fuente: Muestra de cálculo, sección 4.4.3.

Figura 18. Grafica de correlación polinomial para datos de la tabla VII



Fuente: Tabla VII

Según la ecuación de correlación polinomial de grado cuatro, encontrada a partir de la tabla VII, la concentración mínima de ácido sulfúrico para cumplir con las condiciones de operación, debe ser de 15.92%, pero para asegurar la completa recuperación del hierro (III) y cumplir las medidas necesarias de seguridad, se manejarán concentraciones de 20, 25 y 30%.

12.7 Material

12.7.1 Material de apoyo

- Agua desmineralizada "Salvavidas[®]".
- Cal hidratada (hidróxido de calcio) "Horcalsa[®]".
- Energía eléctrica suministrada a la unidad de trabajo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.; Voltaje 220V, Amperaje 30A, Corriente Alterna.
- Contenedores de polietileno para la materia prima, desechos y productos.

12.8 Materia prima

12.8.1 Ácido Sulfúrico

12.8.1.1 Descripción física y química

Tabla VIII. Descripción física y química del ácido sulfúrico

| | |
|----------------------------|------------------------------------|
| Nombre | Ácido Sulfúrico 98% |
| Formula química | H_2SO_4 |
| Solubilidad en agua (20°C) | Soluble (Desprendimiento de calor) |
| Masa molar | 98.08 g/mol |
| pH (20°C) | Fuertemente ácido |
| Punto de fusión | 15°C |
| Punto de ebullición | 330°C |
| Clase de toxicidad | (CH)2 |
| Presión de vapor (20°C) | 0.0001mbar |
| Absorbencia de agua | Higroscópico |
| Color | Incoloro |
| Consistencia | Líquido |
| Densidad específica (20°C) | 1.84g/ml |

Fuente: Referencia bibliográfica No. 6

12.8.2 Hematita roja

12.8.2.1 Descripción física y química

Tabla IX. Descripción física de la hematita roja

| | |
|----------------------------|--|
| Color | Café rojizo |
| Consistencia | Terroso |
| Mesh (Tamaño de partícula) | 140 (106 μm) – 200 (75 μm) |
| Densidad | 2.71g/ml |

Fuente: Referencia bibliográfica No. 3 y laboratorio de química, USAC

Tabla X. Descripción química de la hematita roja

| Composición química | |
|-------------------------|---------|
| SiO_2 | 36.59 % |
| Fe_2O_3 | 37.37 % |
| Al_2O_3 | 10.04 % |
| CaO | 0.51 % |
| MgO | 0.00 % |
| K_2O | 2.07 % |
| Na_2O | 0.59 % |
| SO_3 | 0.27 % |
| P_2O_5 | 0.31 % |
| TiO_2 | 0.75 % |
| Cr_2O_3 | 0.08 % |
| MnO | 0.03 % |
| LOI (950°C) | 8.98 % |
| Total | 97.59 % |

Fuente: Anexo 4

12.9 Equipo

- Recipientes de polietileno de 5 y 10 gal.
- Unidad de lixiviación y filtración.
- Equipo de laboratorio para análisis químicos inorgánicos.

12.9.1 Especificaciones técnicas de la unidad por equipos

12.9.1.1 Tamizador

Tabla XI. Especificaciones técnicas del tamizador

| | |
|--------------------------------|--|
| Mesh (tamaño de partícula) | 140 (106 μm) - 200 (75 μm) |
| Diámetro de bastidor | 21cm |
| Alto de bastidor | 7cm |
| Profundidad a la tela | 5cm |
| Material de bastidor | Cobre |
| Material de la red de tamizado | Acero inoxidable |
| Voltaje máximo de uso | 110V |

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Tamizador eléctrico marca "Humbold" de carga y descarga manual, que consta de 8 bastidores marca "Soiltest" en serie vertical, colocados sobre una base agitadora y asegurados por un brazo móvil que a su vez golpea la parte superior de la torre de bastidores para generar mayor vibración en la muestra y mejor tamizado.

12.9.1.2 Sistema de agitación

Tabla XII. Especificaciones técnicas del sistema de agitación

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Tipo de agitador | Propulsor de tres aspas |
| Angulo de agitador | 0° |
| Velocidad Promedio del agitador | 1000 rpm |
| Diámetro de propulsor | 14.5cm |
| Potencia | 1hp |
| Voltaje máximo | 220V |
| Amperaje | 3.6A |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Agitador metálico marca "Kenstar" tipo marítimo de tres aspas con un ángulo fijo de 0° que opera a una velocidad promedio de 1000 rpm a una potencia de 1hp, con un diámetro de propulsor de 14.5cm.

12.9.1.3 Reactor

Tabla XIII. Especificaciones técnicas del reactor

| | Reactor rojo | Reactor azul |
|--------------------|--------------|--------------|
| Volumen de reactor | 10gal | 5gal |
| Diámetro inferior | 44cm | 25 |
| Diámetro superior | 63cm | 30 |
| Altura del reactor | 51cm | 33 |
| Material | Polietileno | |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Recipiente de polietileno marca "Guateplast", resistente a bajos valores de pH.

12.9.1.4 Compresor

Tabla XIV. Especificaciones técnicas del compresor

| | |
|----------------|-----------------|
| Potencia | 3.4hp |
| Volumen | 50L |
| Presión máxima | 13bar (175psig) |
| Voltaje máximo | 240V |
| Amperaje | 20 ^a |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

12.9.1.5 Bomba de desplazamiento positivo

Tabla XV. Especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo

| | |
|---|--|
| Máxima presión de aire | 8.5bar (125psig) |
| Material de cámaras y colectores | Polipropileno, PVDF, Teflon [®] PFA |
| Material de sección central | Polipropileno |
| Válvulas de aire | Cobre o Nickel-Plata |
| Máximo diámetro de sólidos | 1/16" (1.6 mm) |
| Máxima capacidad de levantamiento por succión | Levantamiento en seco 13' (3.9 m) |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Bomba de desplazamiento positivo Turbo-Flow™ T1 - 13 mm (1/2") Plastic Pump, marca "Wilden", fabricada principalmente de polipropileno, que puede manejar un máximo diámetro de sólidos de 1.6mm, soportando una máxima presión de aire de 8.5bar, produciendo una capacidad máxima de levantamiento por succión en seco de 3.9m

12.9.1.6 Filtro prensa

Tabla XVI. Especificaciones técnicas del filtro prensa

| | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Capacidad del filtro | 5lb |
| No. De placas | 8 |
| No. De marcos | 9 |
| Área de contacto por hoja | 100cm ² |
| Mecanismo de compresión de placas | Tornillo |
| Medio filtrante | Lona cruda (100% algodón) |

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Filtro prensa de ocho placas y nueve marcos alternados de 10*10cm cada uno, con un área de 100cm² por unidad, que utiliza como medio filtrante lona cruda.

12.10 Especificación técnica de la unidad completa de trabajo

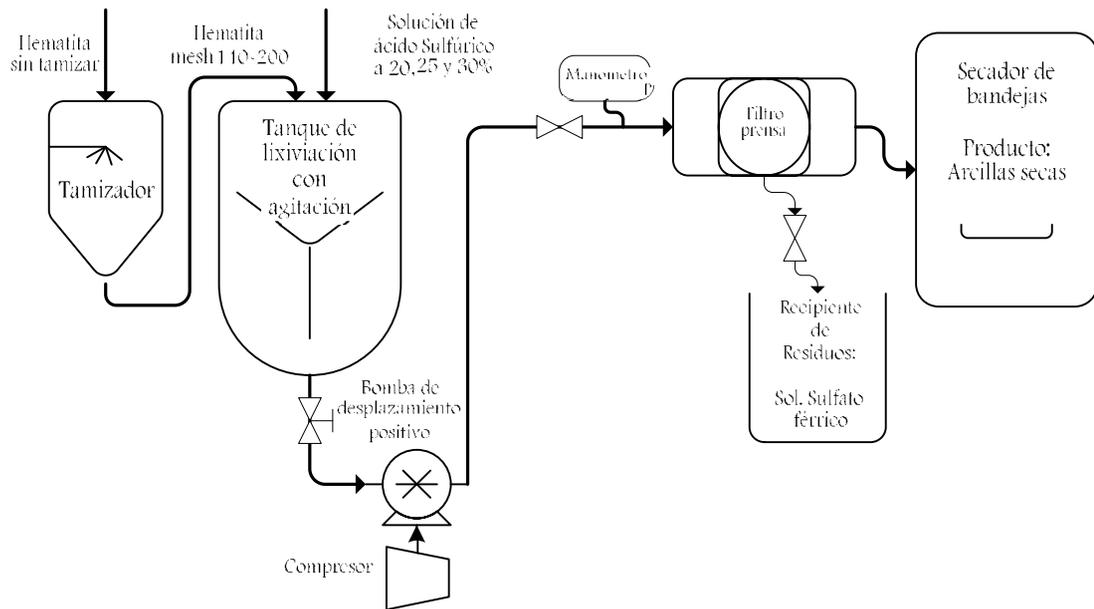
Como se observa en la figura 19 se cuenta con una unidad que consta de un tanque de tratamiento de polietileno, cuyo volumen es de 5gal, con un agitador propulsor de tres aspas, un filtro prensa de ocho placas y nueve marcos alternados de 10cm*10cm cada uno, con un área de 100cm² por unidad, que utiliza como medio filtrante lona cruda, sostenidos por un soporte y presionados unos contra otros con un mecanismo cerrado de tornillo. La suspensión de alimentación es impulsada por una bomba de desplazamiento positivo hacia el filtro prensa (Ver diagramas de flujo, Figura 20 y 21).

Figura 19. Unidad de lixiviación y filtración del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala



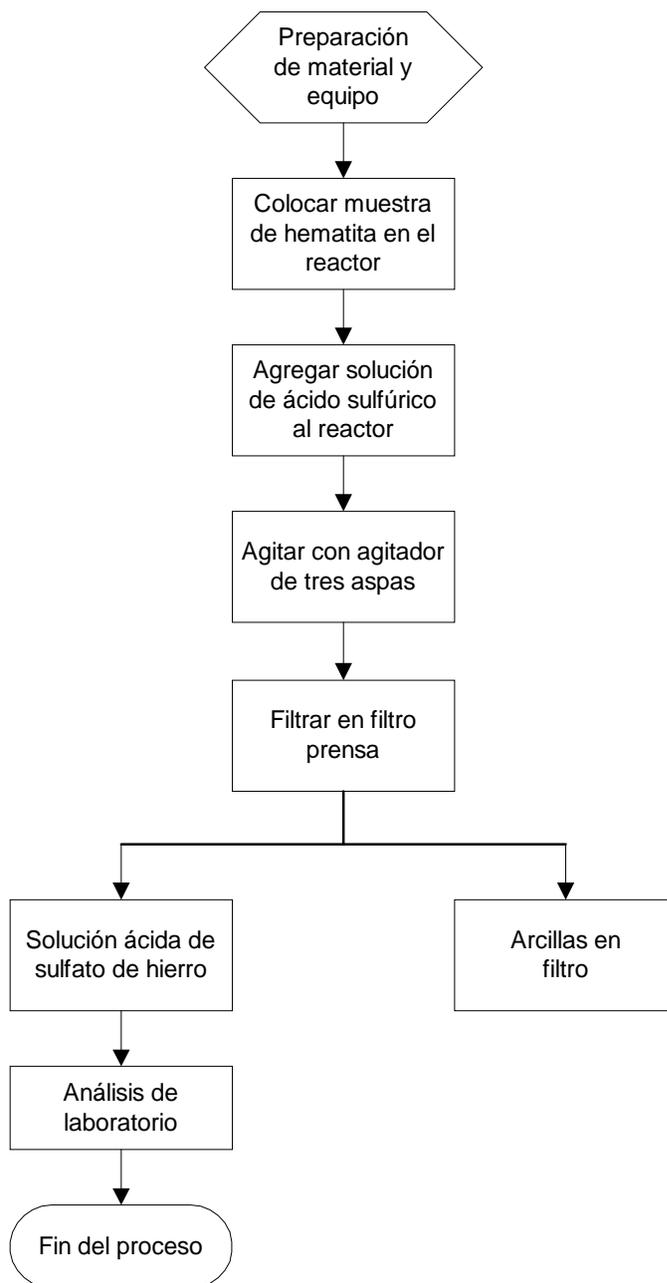
Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 20. Diagrama del equipo para el proceso de recuperación de hierro (III) en forma de sulfato férrico en solución de ácido sulfúrico, a partir de lixiviación de mineral de hematita



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 21. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de hierro (III) en forma de sulfato férrico en solución de ácido sulfúrico, a partir de lixiviación de mineral de hematita



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

12.11 Modelo estadístico

Se empleó un diseño completamente aleatorio involucrando combinaciones de tratamientos factoriales. Para determinar cual de las tres concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) y tiempo de reacción es preferible, se determinó la cantidad de extracción de Fe(III), analizando muestras en cuatro tiempos distintos. En el experimento se obtuvieron observaciones duplicadas de extracción de Fe(III) en cada combinación de tratamientos, que dio un total de $12 \times 2 = 24$ unidades experimentales.

Con estos registros se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

- Porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III) empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo respecto a la cantidad teórica esperada.
- Porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III) empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo respecto a la cantidad estipulada por la AWWA.
- Análisis de variancia para dos factores (concentración de ácido sulfúrico y tiempo de reacción) en función de la extracción de Fe(III).

12.12 Manejo de resultados

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los datos obtenidos durante la experimentación y las pruebas de laboratorio.

Tabla XVII. Datos experimentales en el proceso de lixiviación de hematita

| | | |
|---|--|------------------|
| | Sulfato férrico | |
| Datos medibles durante de la experimentación | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumen ▪ Densidad (Picnómetro) | |
| Determinaciones de laboratorio después de la experimentación | Hierro férrico | No menos del 9 % |
| | Ácido libre | pH de 2 o menos |

Fuente: Capítulo 9

Tabla XVIII. Hoja de datos originales para el análisis de Sulfato férrico.

| Solución de ácido sulfúrico (% en volumen) | Prueba | 30min | | 60min | | 90min | | 120min | |
|--|----------------|-------|--|-------|--|-------|--|--------|--|
| | | | | | | | | | |
| 20 | Densidad | | | | | | | | |
| | pH | | | | | | | | |
| | Hierro férrico | | | | | | | | |
| 25 | Densidad | | | | | | | | |
| | pH | | | | | | | | |
| | Hierro férrico | | | | | | | | |
| 30 | Densidad | | | | | | | | |
| | pH | | | | | | | | |
| | Hierro férrico | | | | | | | | |

Fuente: Experimental

12.13 Manejo de desechos.

Los residuos de sulfato férrico fueron neutralizados con hidróxido de calcio (cal hidratada) que al reaccionar forman una combinación de sulfato de calcio y sulfato férrico, y dadas sus cualidades no tóxicas funcionan como una buena enmienda de tierras, por lo que fueron vertidos, junto con los desechos de arcilla lavada, en la tierra de los jardines de la Facultad.

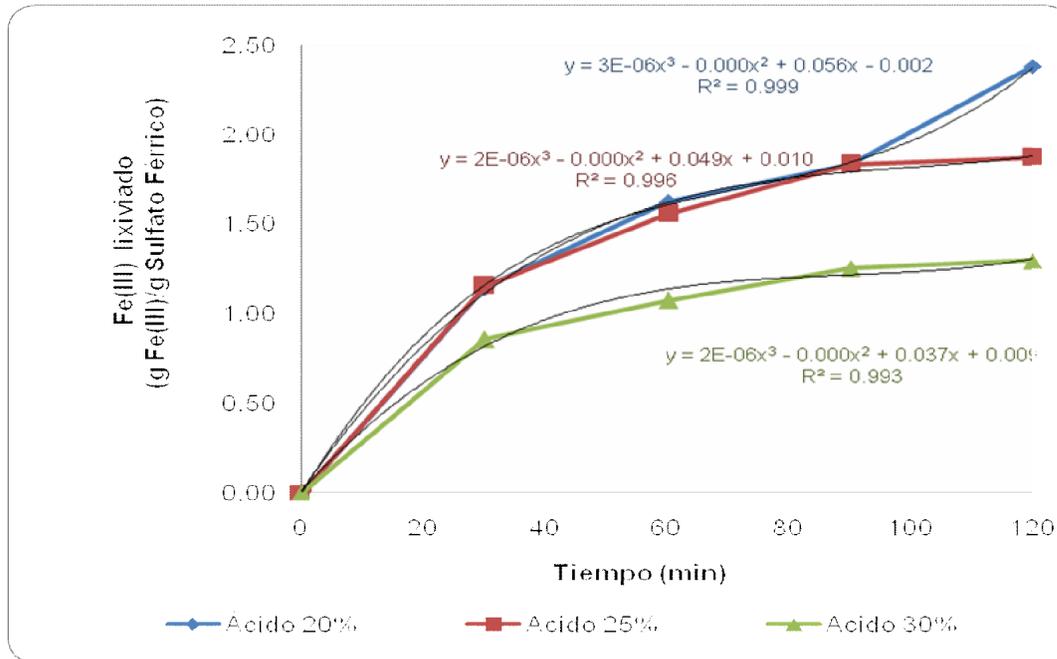
13 RESULTADOS

Tabla XIX. Porcentaje de extracción de hierro (III) a partir de hematita , empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico en función del tiempo

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo (min) | Fe(III) lixiviado | | |
|---|--------------|---|--------|-------|
| | | Análisis de laboratorio porcentaje promedio de recuperación (g Fe(III)/ g ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)) | (g) | (%) |
| 20 | 30 | 1.15 | 102.96 | 10.65 |
| | 60 | 1.62 | 145.66 | 15.06 |
| | 90 | 1.83 | 164.33 | 16.99 |
| | 120 | 2.38 | 213.71 | 22.10 |
| 25 | 30 | 1.16 | 87.78 | 9.08 |
| | 60 | 1.56 | 118.26 | 12.23 |
| | 90 | 1.83 | 139.19 | 14.39 |
| | 120 | 1.87 | 141.86 | 14.67 |
| 30 | 30 | 0.86 | 57.16 | 5.91 |
| | 60 | 1.08 | 71.74 | 7.42 |
| | 90 | 1.25 | 83.59 | 8.64 |
| | 120 | 1.30 | 86.39 | 8.93 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XLV

Figura 22. Gráfica de recuperación de Fe(III) en solución de sulfato férrico para tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo



Fuente: Tabla XIX

Tabla No. XX. **Eficiencia en extracción de Fe(III) para cada concentración de solución de ácido sulfúrico utilizada, y en función del tiempo**

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo (min) | Eficiencia de la extracción (%) |
|--|---------------------|--|
| 20 | 30 | 10.65 |
| | 60 | 15.06 |
| | 90 | 16.99 |
| | 120 | 22.10 |
| 25 | 30 | 9.10 |
| | 60 | 12.26 |
| | 90 | 14.43 |
| | 120 | 14.71 |
| 30 | 30 | 5.91 |
| | 60 | 7.42 |
| | 90 | 8.64 |
| | 120 | 8.93 |

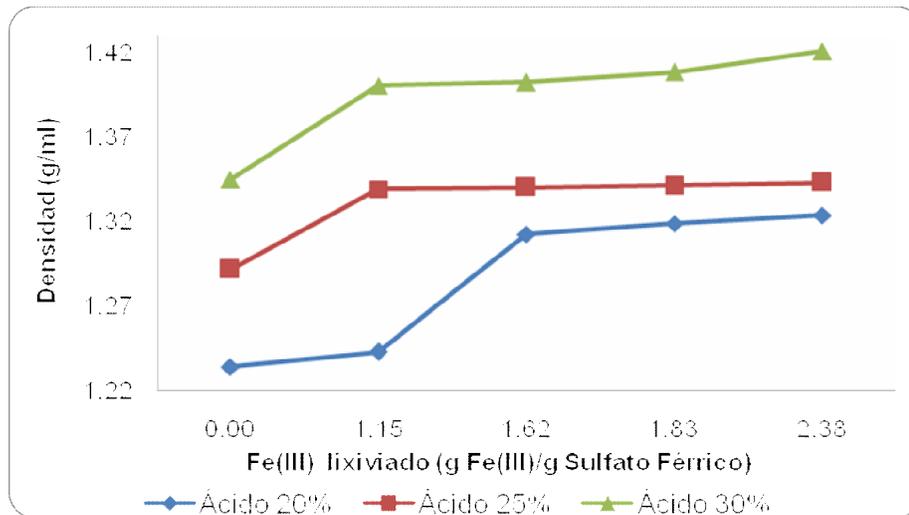
Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XLVI

Tabla No. XXI. Densidad de las soluciones de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico, en función del tiempo

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Porcentaje en peso promedio de recuperación de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | Densidad experimental (g/ml) |
|---|--------------------------|--|------------------------------|
| 20 | 0 | 0 | 1.2346 |
| | 30 | 1.15 | 1.2434 |
| | 60 | 1.62 | 1.3126 |
| | 90 | 1.83 | 1.3187 |
| | 120 | 2.38 | 1.3238 |
| 25 | 0 | 0 | 1.2917 |
| | 30 | 1.16 | 1.3391 |
| | 60 | 1.56 | 1.3401 |
| | 90 | 1.83 | 1.3411 |
| | 120 | 1.87 | 1.3432 |
| 30 | 0 | 0 | 1.3449 |
| | 30 | 0.86 | 1.4002 |
| | 60 | 1.08 | 1.4022 |
| | 90 | 1.25 | 1.4084 |
| | 120 | 1.30 | 1.4206 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XXXIX

Figura 23. Gráfica de densidad de la solución de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función de la extracción de Fe(III)



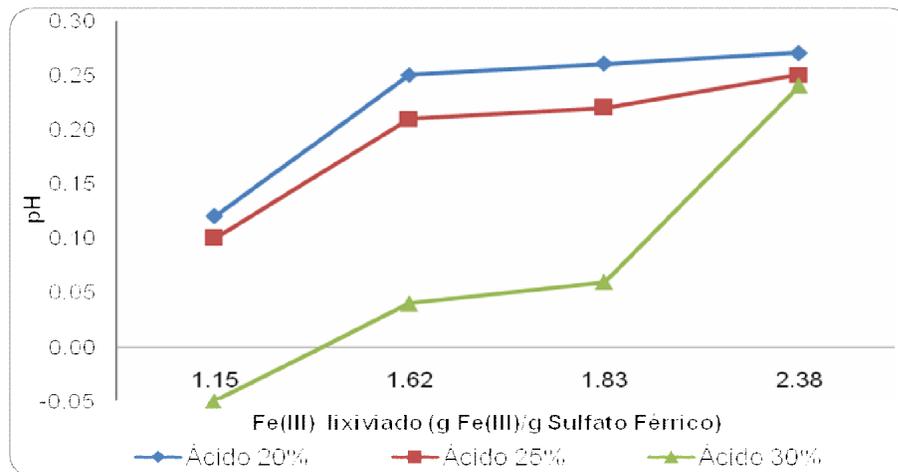
Fuente: Tabla XXI

Tabla XXII. Comparación de las características de la solución de sulfato férrico obtenida por lixiviación, empleando tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo, con base en las especificaciones para soluciones de sulfato férrico, según los requerimientos establecidos (pH 2 y %Fe(III) 9) para el tratamiento de agua establecidos por la norma B406 de la AWWA

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo (min) | Porcentaje en peso promedio de recuperación de Fe(III) (g Fe(III)/g ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)) | Porcentaje de eficiencia en comparación con el requerimiento de la AWWA (%) | pH |
|---|--------------|---|---|-------|
| 20 | 30 | 1.15 | 12.75 | 0.12 |
| | 60 | 1.62 | 18.04 | 0.25 |
| | 90 | 1.83 | 20.35 | 0.26 |
| | 120 | 2.38 | 26.47 | 0.27 |
| 25 | 30 | 1.16 | 12.85 | 0.1 |
| | 60 | 1.56 | 17.32 | 0.21 |
| | 90 | 1.83 | 20.38 | 0.22 |
| | 120 | 1.87 | 20.77 | 0.25 |
| 30 | 30 | 0.86 | 9.53 | -0.05 |
| | 60 | 1.08 | 11.96 | 0.04 |
| | 90 | 1.25 | 13.94 | 0.06 |
| | 120 | 1.30 | 14.40 | 0.24 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XLVI

Figura 24. Gráfica de pH de la solución de sulfato férrico empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función de la extracción de Fe(III)



Fuente: Tabla XXII

Tabla XXIII. **Porcentaje de extracción de hierro (III) a partir de hematita utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo**

| Tiempo (horas) | Fe(III) lixiviado | | |
|----------------|---|--------|-------|
| | Análisis de laboratorio porcentaje en peso promedio de recuperación (g Fe(III)/g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | (g) | (%) |
| 0.5 | 1.16 | 104.08 | 10.76 |
| 1 | 1.41 | 126.51 | 13.08 |
| 1.5 | 1.72 | 154.32 | 15.96 |
| 2 | 2.24 | 200.97 | 20.78 |
| 3 | 2.96 | 265.57 | 27.46 |
| 7 | 4.12 | 369.65 | 38.22 |
| 12 | 5.49 | 492.56 | 50.93 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla LIII

Tabla XXIV. **Eficiencia en extracción de Fe(III) empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo**

| Tiempo (horas) | Eficiencia de extracción (%) |
|----------------|------------------------------|
| 0.5 | 10.76 |
| 1 | 13.08 |
| 1.5 | 15.96 |
| 2 | 20.78 |
| 3 | 27.46 |
| 7 | 38.22 |
| 12 | 50.93 |

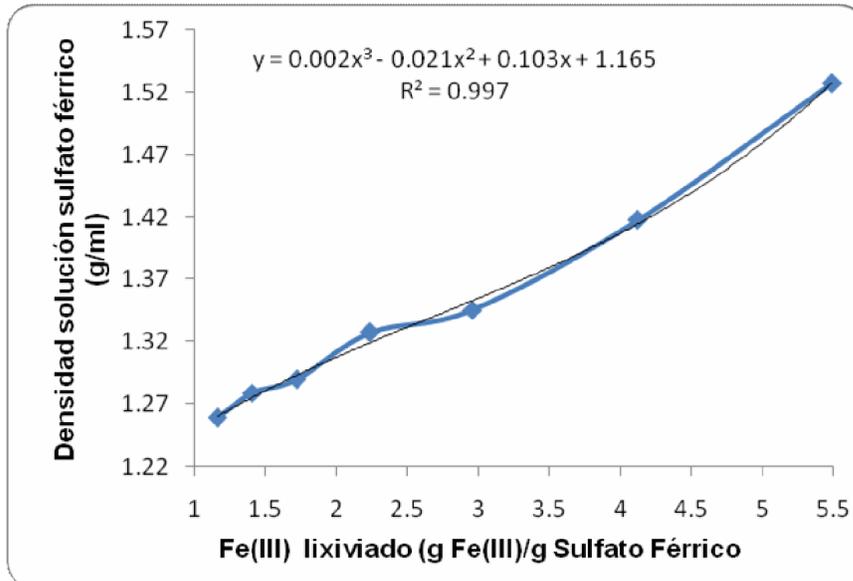
Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla LIV

Tabla XXV. **Densidad experimental de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo**

| Tiempo de reacción (horas) | Densidad experimental (g/ml) |
|----------------------------|------------------------------|
| 0.5 | 1.2589 |
| 1 | 1.2790 |
| 1.5 | 1.2899 |
| 2 | 1.3278 |
| 3 | 1.3456 |
| 7 | 1.4178 |
| 12 | 1.5269 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XLVII

Figura 25. **Gráfica de densidad de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función de la extracción de Fe(III)**



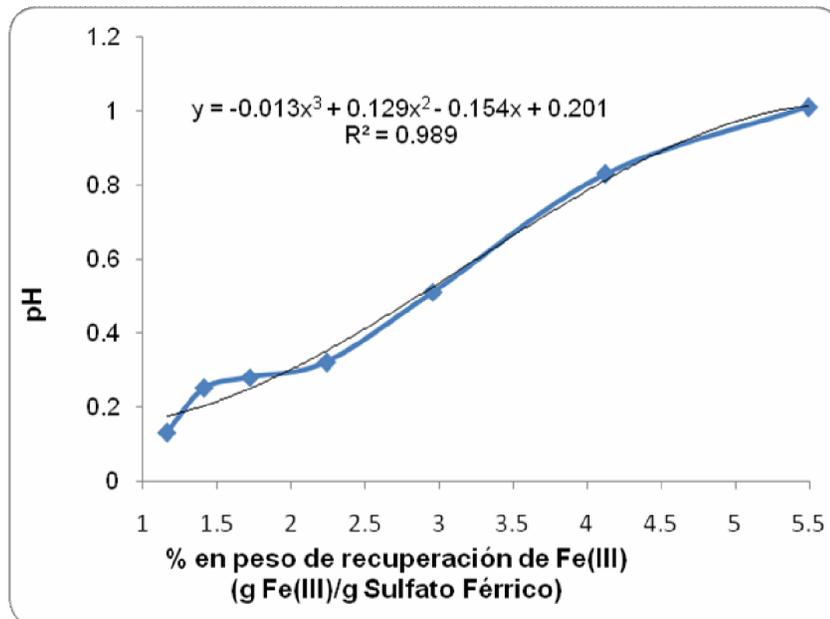
Fuente: Tabla XXV

Tabla XXVI. Comparación de las características de la solución de sulfato férrico obtenida por lixiviación, empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo, con base en las especificaciones para soluciones de sulfato férrico, según los requerimientos establecidos (pH 2 y %Fe(III) 9) para el tratamiento de agua establecidos por la norma B406 de la AWWA

| Tiempo de reacción (horas) | Porcentaje en peso promedio de recuperación de Fe(III) (g Fe(III)/g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | Porcentaje de eficiencia en comparación con el requerimiento de la AWWA (%) | pH |
|----------------------------|--|---|------|
| 0.5 | 1.16 | 12.89 | 0.13 |
| 1 | 1.41 | 15.67 | 0.25 |
| 1.5 | 1.72 | 19.11 | 0.28 |
| 2 | 2.24 | 24.89 | 0.32 |
| 3 | 2.96 | 32.89 | 0.51 |
| 7 | 4.12 | 45.78 | 0.83 |
| 12 | 5.49 | 61.00 | 1.01 |

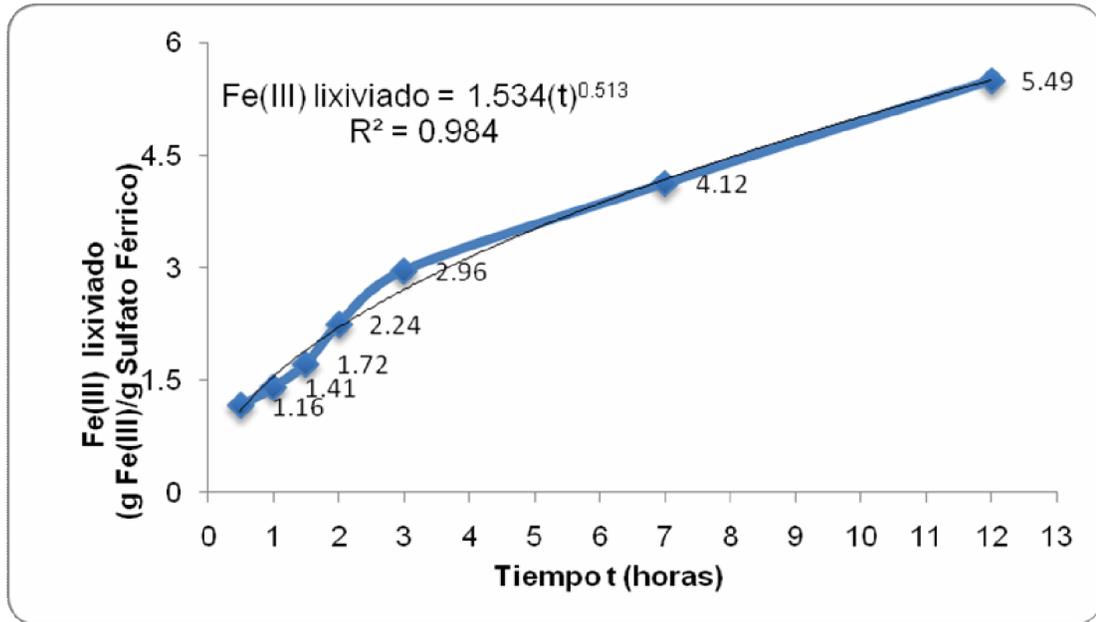
Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla LIV

Figura 26. Gráfica de pH de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función de la extracción de Fe(III)



Fuente: Tabla XXVI

Figura 27. Gráfica de correlación para estimar el tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación, empleando ácido sulfúrico al 20%, para las condiciones experimentales realizadas



Fuente: Tabla XXVI

Tabla XXVII. Tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación, empleando ácido sulfúrico al 20%, para las condiciones experimentales realizadas

| Tiempo de reacción (horas) | Porcentaje en peso de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/g($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)) |
|----------------------------|---|
| 31.47 | 9.00 |
| 44.74 | 10.78 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla LV

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo de graduación fue evaluar la técnica de extracción de Fe(III) por lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico a partir de mineral de hematita a nivel planta piloto.

La hematita estudiada proviene de la mina "Quebrada María" ubicada en Camotán, Chiquimula en las coordenadas latitud norte 14°49'13" longitud oeste 89°22'24". Presentaba un porcentaje del 37.37% de óxido férrico, un 36.59% de SiO_2 y un 10.04% de Al_2O_3 , como componentes mas representativos, además de otros compuestos tales como CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 , P_2O_5 , TiO_2 , etc.

Empleando la unidad de lixiviación de la facultad de Ingeniería se analizó la reacción $Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$ producida por el óxido férrico contenido en la hematita y el solvente extractor (ácido sulfúrico diluido). La unidad de lixiviación consiste en un tanque de tratamiento de polietileno, cuyo volumen es de 5 gal, con un agitador propulsor de tres aspas, un filtro prensa de ocho placas y nueve marcos, con un área de 100 cm^2 por unidad, que utiliza como medio filtrante lona cruda. La suspensión de alimentación es impulsada por una bomba de desplazamiento positivo hacia el filtro prensa.

Se pesaron tres lotes de 3700 gramos de hematita, a cada lote por separado se le agrego ácido sulfúrico al 20, 25 y 30 % en volumen, respetando la relación estequiométrica de la reacción entre el óxido férrico y el ácido sulfúrico. Una vez iniciada la reacción se procedió a agitar por medio de un agitador de tres aspas, al concluir dos horas de reacción se procedió a la

filtración de la mezcla por medio de un filtro prensa. Separando la parte líquida de la sólida.

Para analizar el Fe(III) extraído de la hematita y la interacción entre la concentración de solvente extractor y el tiempo necesario para llevar a cabo la reacción. Se recolectaron alícuotas cada media hora durante dos horas de iniciada la reacción, este proceso fue efectuado para las tres concentraciones de ácido sulfúrico empleadas (20, 25 y 30% en volumen). Las muestras de solución de sulfato férrico fueron filtradas y analizadas en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Farmacia, por medio de fluorescencia de rayos X, evaluando la cantidad de Fe (III) presente en cada una de las soluciones. Se obtuvieron observaciones duplicadas de porcentaje en peso de Fe (III) en cada combinación de tratamientos (ver tabla XIX). También se registro la densidad y el pH de cada muestra (ver tablas XXI y XXII).

A partir de los valores de extracción de Fe(III) se realizó un análisis de varianza de dos factores (concentración de ácido sulfúrico y tiempo de reacción) (ver apéndice 3), y se concluyó que existe una diferencia significativa en la extracción de Fe(III), al emplear distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido), y que si existe una diferencia perceptible en la extracción de Fe(III) en función del tiempo de reacción. Y por lo tanto existe una interacción entre la concentración de solvente extractor y tiempo de reacción, con lo cual se verifico la hipótesis alternativa planteada.

Con los datos recopilados se realizaron varias gráficas de análisis. En la figura 22 se observa el comportamiento de la extracción de Fe(III) empleando tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo. Se observó un incremento en la extracción de Fe(III) a medida que se disminuye la concentración de ácido sulfúrico, la cual también va ligada al tiempo de

reacción, a mayor tiempo, mayor extracción. En los valores de la tabla XIX se registró que el mayor porcentaje de extracción de Fe(III), se produjo al emplear ácido sulfúrico al 20% durante un tiempo de 120 minutos, obteniéndose un porcentaje de extracción del 22.10%.

La figura 23 indica el comportamiento de la densidad de la solución empleando tres concentraciones de ácido sulfúrico, en función del Fe(III) lixiviado y se concluye, que a mayor concentración de ácido, mayor densidad y al incrementarse la densidad de la solución, aumenta la extracción de Fe(III),

El comportamiento del pH en función del Fe(III) lixiviado se visualiza en la figura 24, e indica que a menor concentración de ácido se produce un pH más alto, que indica una mayor extracción de Fe(III).

La tabla XX indica la eficiencia del método, lo cual ubica en una solución de ácido sulfúrico al 20%. Al analizar la figura 22 se observa un punto de quiebre en la gráfica del 20%, que indica que la absorción hacia la partícula comienza a generarse. Para verificarlo se realizó una segunda experimentación empleando ácido sulfúrico al 20% y las mismas condiciones del primer experimento. Y se tomaron alícuotas a las 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 7 y 12 horas de iniciada la reacción. Las muestras fueron filtradas y analizadas por medio de fluorescencia de rayos X, para determinar el Fe(III) extraído y al igual que las primeras soluciones se recopilaron datos de densidad y pH.

Al analizar los nuevos datos se verifica en la Tabla XXIII y XXIV que la extracción de Fe(III), se incrementa y la partícula comienza a absorber al ácido sulfúrico provocando una reacción más favorable, indicando una eficiencia a las 12 horas de 50.93%. Para encontrar el tiempo de agotamiento máximo del Fe(III) por lixiviación para las condiciones experimentales realizadas, se hizo

una gráfica de correlación de Fe(III) lixiviado en función del tiempo empleando ácido sulfúrico al 20% (figura 27). Esto nos proporciona el modelo exponencial $Fe(III)_{\text{lixiviado}} = 1.534(t)^{0.513}$ el cual indica que la extracción será total a las 44.74 horas de iniciado el proceso de lixiviación.

Para corroborar el uso del sulfato férrico para tratamiento de agua se planteó como lineamiento los requerimientos de hierro férrico y pH establecidos por la norma B406 de la AWWA para sulfato férrico. El pH debe ser 2, en la tabla XXII y XXVI se observa que todas las soluciones cumplen con este requerimiento. La segunda condición indica que la solución de sulfato férrico debe contener por lo menos un 9% de hierro férrico. Para llegar a este mínimo establecido se empleo el modelo que se incluye en la figura 27 e indica que se logrará en un tiempo de 31.47 horas.

Los procesos hidrometalúrgicos se caracterizan por elevados tiempos de reacción. Sin embargo es posible el descenso del tiempo de reacción en este proceso, modificando ciertas características del equipo. El principal inconveniente es la relación entre el diámetro del tanque del tratamiento y el diámetro del agitador, el cual es de 0.145 m, mientras que el teórico requerido debe ser de 0.19 m (apéndice 1, sección 7). Para mejorarlo es conveniente modificar el agitador o el tanque de tratamiento de forma que se logre una relación adecuada. También es aconsejable agregar un excedente de ácido sulfúrico ya que la hematita está conformada por otros óxidos, que reaccionan y provocan que el ácido sulfúrico funcione como reactivo limitante.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo mayor extracción de Fe(III), con un porcentaje de extracción de 22.10% con la solución de ácido sulfúrico al 20% , en un tiempo de dos horas.
2. El tiempo calculado para obtención del contenido de Fe(III) mínimo de 9% , según la norma AWWA es de 31.47 horas empleando ácido sulfúrico al 20% con base en el modelo matemático
$$Fe(III)_{lixiviado} \frac{gFe^{+3}}{gFe_2(SO_4)_3} = 1.534(t)^{0.513}$$
3. El tiempo para extracción completa del Fe(III) de la hematita es calculado en 44.74 horas con solución al 20% con base en el modelo matemático
$$Fe(III)_{lixiviado} \frac{gFe^{+3}}{gFe_2(SO_4)_3} = 1.534(t)^{0.513}$$
4. Existe variación significativa en el porcentaje de extracción de hierro en hematita con relación a la variación en la concentración de coadyuvante (ácido sulfúrico).

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

RECOMENDACIONES

1. Para maximizar el proceso de reacción es conveniente utilizar coadyuvante en exceso, puesto que en la hematita existen otros óxidos que también reaccionan con el ácido sulfúrico.
2. Se demostró que el tamaño del diámetro del agitador resultó reducido, con relación al diámetro del tanque. Por lo que es conveniente la construcción de otros agitadores para la unidad de lixiviación.
3. Realizar otros estudios de trabajo de graduación para analizar las condiciones de operación en relación a factores como tamaño de partícula, lote, concentración de coadyuvante, velocidad de reacción, etc.
4. Incrementar el número de placas para mejorar el proceso de filtración en la unidad de filtro prensa.
5. Realizar otros estudios de trabajos de graduación, utilizando otros minerales tales como cromita, así como otros coadyuvantes como ácido clorhídrico, salmueras, etc.
6. Al realizar este tipo de estudios experimentales, procurar utilizar el material, equipo de seguridad personal y de laboratorio necesario para llevar a cabo la operatoria respectiva.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alvarado, Carlos y Oscar Rosa. **Guía del inversionista minero**. <http://www.lib.utexas.edu/benson/lagovdocs/guatemala/federal/minas/guia-inversionista-minero.pdf>. Guatemala 1999
2. Anónimo. **Curva granulométrica**. http://es.wikipedia.org/wiki/Curva_granulom%C3%A9trica
3. Anónimo. **Estándar de la AWWA para sulfato férrico en el tratamiento de aguas (AWWA B406)**. <http://www.awwa.org/>
4. Anónimo. **Hematita**. <http://es.wikipedia.org/wiki/Hematita>.
5. Cárdenas, Yolanda. **Tratamiento de agua: coagulación-floculación**. <http://www.sedapal.com.pe/bvs/coagulacion-floculacion.pdfv>. Perú 2000
6. Causa, Enrique y Carlos Pinto. **Investigación sobre procesos de coagulación y floculación de aguas en plantas de tratamiento**. Santiago, Chile, 1974.
7. Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3era. edición; México: Editorial CECSA, 1998. p.p. 161-164, 800-807
8. Guevara, Mario. **Chiquimula, La perla de Oriente**. www.chiquimulaonline.com/mapa_chiquimula.jpg. Guatemala 2005
9. Mc. Cabe, Warren y otros. **Operaciones unitarias en ingeniería química**. 4ta. edición; España: Editorial Mc. Graw-Hill, 1991. p.p. 618-627, 987-1008

10. Perry, Robert H. y Cecil H. Chilton. **Manual del ingeniero químico**. 5ta. edición; México: Editorial Mc. Graw Hill. p.p. 21-73 a 21-77.
11. Raymond, Kira, S. D. Othmer. **Enciclopedia de tecnología química**. Tomo VIII; México: Editorial Hispanoamericana, 1962. p.p. 180 -232.
12. Treybal, Robert. **Operaciones de transferencia de masa**. 2da. Edición. Editorial McGraw-Hill, México 2002, 23-42, 656-669, 792-797 p.p.
13. Valdivia, Alba y otros. **Magnetic mineralogy and properties of the Peña Colorada iron ore deposit, Guerrero Terrane: implications for magnetometric modeling**. Estados Unidos, 2000.
14. Valdivia, Alma y M., Luís. **Expedición a la cordillera de los Andes: consideraciones sobre el hierro y estudio del yacimiento ferrífero El Laco, Chile**". Instituto de Geofísica (UNAM), Octubre 2003.
15. Walpole, Ronald, **Probabilidad y estadística para ingenieros**. Sexta edición, Editorial Pearson Educación, México 1999, 463 -468 p.p.
16. Weber, Walter. **Control de la calidad del agua. Procesos Físicoquímicos**. España: Editorial Riverté, 1979. p.p. 64 -85.
17. Zorilla A. Santiago y Torres X. Miguel. **Guía para elaborar la Tesis**. 2da Edición. Editorial McGraw Hill. Pág. 4-87. México 1992. Reimpresión 2005.

BIBLIOGRAFÍA

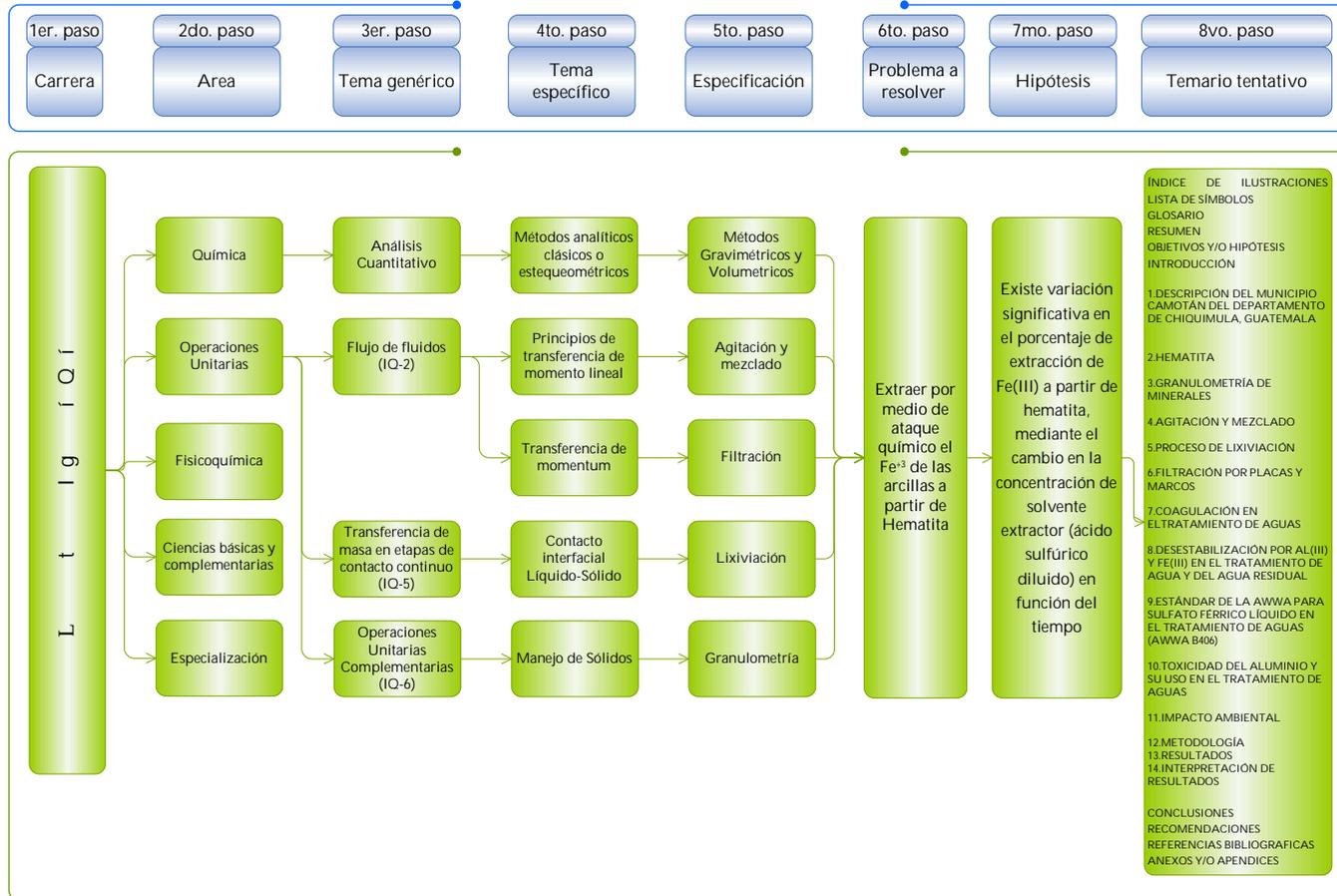
1. Anónimo. **Sulfato férrico**. <http://www.sulfoquimica.com.co/SF.htm>
2. Anónimo. **Sulfato férrico**.
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/nmx-aa-128-scfi-2006.pdf>
3. Chang, Raymond. **Química**. 4ta edición. Editorial Mc Graw-Hill. México 1984
4. Kirk, Raymond y Donald Othmer. **Enciclopedia de tecnología química**. (Volumen 1). México: Editorial Hispanoamericana. 1962.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

APÉNDICES

APÉNDICE 1. DIAGRAMAS

Figura 28. Procedimiento para la elaboración de la tesis de lixiviación de hematita



Fuente: Referencia bibliográfica No. 17

Figura 29. Diagrama esquemático del proceso de lixiviación de hematita

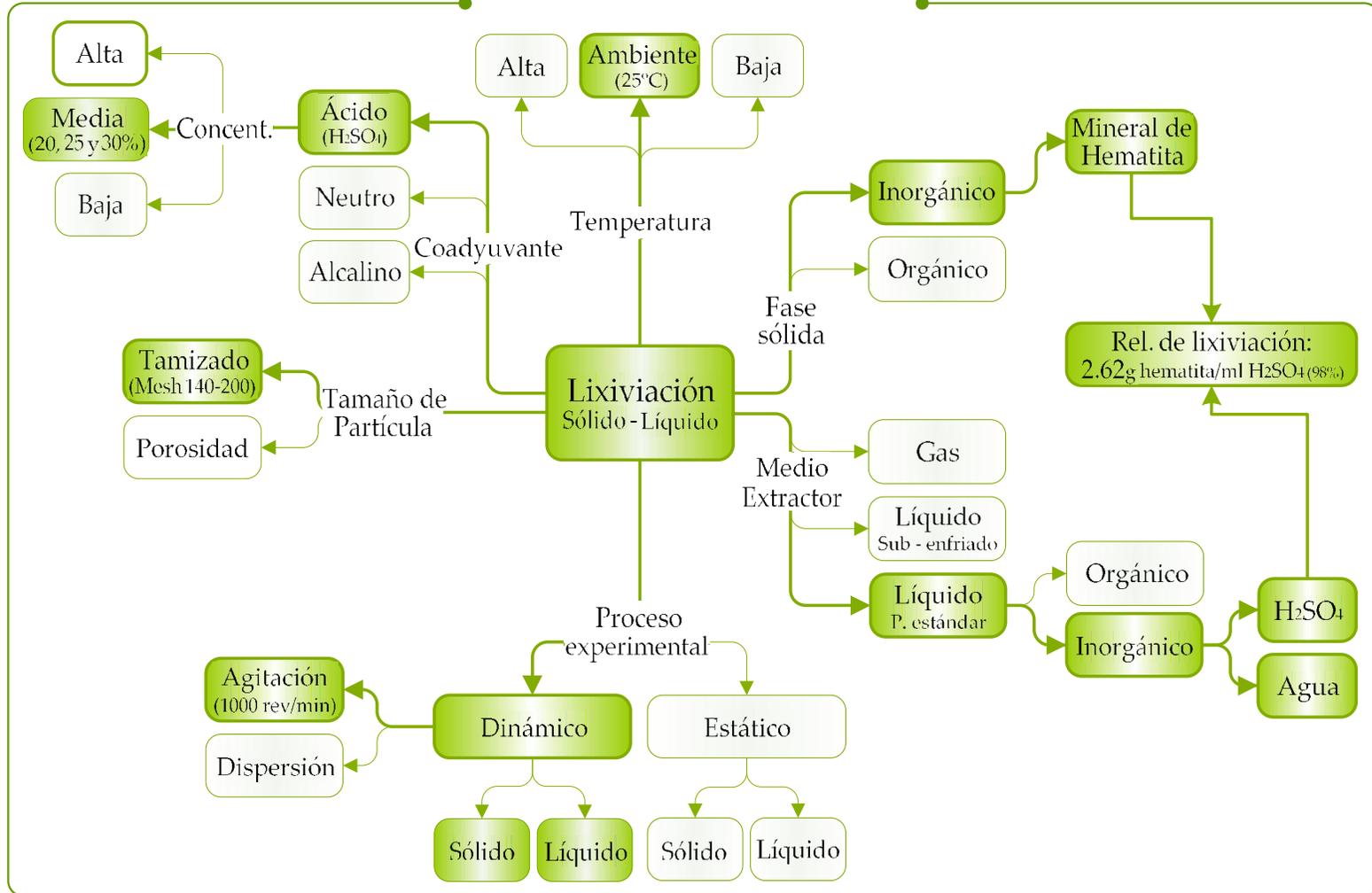
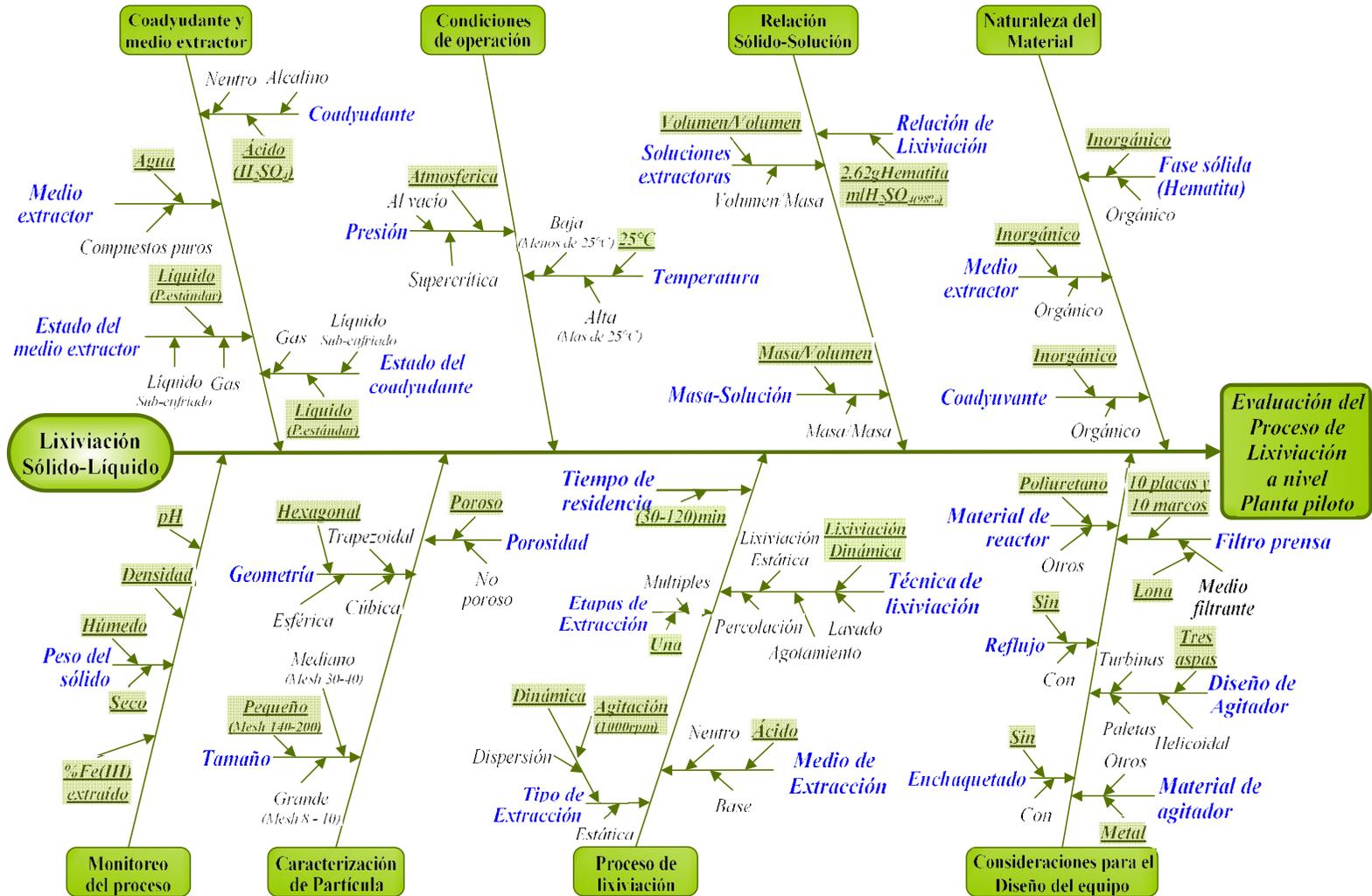


Figura 30. Diagrama de Ishikawa del proceso de lixiviación de hematita (diagrama de espina de pescado)



APÉNDICE 2. MUESTRA DE CÁLCULO

1. Determinación de los valores promedios de los datos obtenidos para cada corrida:

Ecuación No. 5

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 15

Donde:

X_n = Dato

n = No. De dato.

Ejemplo:

(Ácido 20%, tiempo 30 min, corrida 1 y 2. Datos de pH)

$$\bar{X} = \frac{0.11 + 0.13}{2} = 0.12$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tablas XLI, XLII, XLIV, XLIX, L, LI, LII.

2. Determinación de la densidad de soluciones de sulfato férrico

Ecuación No. 6

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 15

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa

V = Volumen

Ejemplo:

(Ácido 20%, tiempo 30 min)

$$\rho = \frac{1.221g}{0.982ml} = 1.24338g / ml = 1243.38g/l$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tablas XXXIX, XLVII

3. Determinación del porcentaje de hierro en las soluciones de sulfato férrico.

Según los datos obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X, se tiene:

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, tiempo 30 min)

$$142.69 \frac{mg \text{ } Fe(III)}{l \text{ solución}(Fe_2(SO)_4)_3} * \frac{1g \text{ } Fe(III)}{1000mg \text{ } Fe(III)} * 100(Factor \text{ de dilución}) * \frac{1l \text{ solución}(Fe_2(SO)_4)_3}{1243.38g \text{ solución}(Fe_2(SO)_4)_3} * 100\% = 1.15\% Fe(III) \left(\frac{g \text{ } Fe(III)}{g \text{ solución}(Fe_2(SO)_4)_3} \right)$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tablas XXX, XL, XLVIII

4. Cálculo de Fe(III) lixiviado en gramos

Ecuación No. 7

$$Fe(III)_{\text{lixiviado}}(g) = \frac{Fe(III)_{\text{lixiviado}}}{\text{Gramos de } Fe_2(SO_4)_3} * 100$$

Ejemplo:

(Ácido 20%, tiempo 30 min)

$$Fe(III)_{\text{lixiviado}}(g) = \frac{1.15}{8972.01 \text{ gramos de } Fe_2(SO_4)_3} * 100 = 102.96 \text{ g de } Fe(III)$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tablas XLV, LIII

5. Determinación del porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III)

Ecuación No. 8

$$\% \text{ Eficiencia} = \left(1 - \frac{D_E}{D_T} \right) * 100$$

Donde:

D_T = Dato teórico

D_E = Dato experimental

Ejemplo:

(Según el porcentaje de recuperación estequiométrico de Fe(III) = 967.10 gramos, Ácido 20%, Tiempo 30 min)

$$\% \text{ Eficiencia} = \left(1 - \frac{102.96}{967.10} \right) * 100 = 10.65\%$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tablas XLVI, LIV

6. Determinación del tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación para las condiciones experimentales realizadas

Con base en la ecuación obtenida de la figura 27 se procede al despeje del tiempo:

Ecuación No. 9

$$t = \left(\frac{Fe(III) \text{ lixiviado}}{1.534} \right)^{1/0.513}$$

$gFe^{+3} / gFe_2(SO_4)_3$

Ejemplo:

(Para el máximo de Fe(III) lixiviado teórico posible 10.74 g $Fe^{+3}/g Fe_2(SO_4)_3$)

$$t = \left(\frac{10.74}{1.534} \right)^{1/0.513} = 44.41 \text{ _horas}$$

De esta forma se efectuó para determinar el tiempo de lixiviación necesario para llegar al 9% de Fe(III) lixiviado. Ver datos finales en tabla LV

7. Determinación de la potencia teórica mínima del impulsor , necesaria para suspender partículas de tamaño y de densidad uniforme, hasta una altura arriba del plano medio del impulsor superior , según las condiciones iniciales de operación.

Ejemplo:
(Ácido 20%)

Se desea extraer el Fe(III) presente en muestras de mineral de hematita. La relación sólido- líquido es 0.53 gr de materia prima (hematita)/ ml de solvente ácido sulfúrico). Se utilizará un lote 3700 g de hematita y de 6.92 litros ácido sulfúrico al 20% (v/v), el volumen ocupado por la mezcla es de 8.29 litros (V_m), y la distancia del impulsor hasta el fondo del tanque es de 0.04m (C).

a. Volumen del sólido

$$V_{\text{sólido}} = 3.7\text{kg}_{\text{-Hematita}} * \frac{1\text{m}^3_{\text{Hematita}}}{2710\text{kg}_{\text{-Hematita}}} = 0.001365\text{m}^3_{\text{Hematita}}$$

b. Volumen de la suspensión:

Ecuación No.10

$$V_{\text{suspensión}} = V_{\text{sólido}} + V_{\text{líquido}}$$

Para determinar el volumen del líquido, ver tabla VII, en la sección de metodología, para cada concentración de ácido sulfúrico utilizado.

$$V_{\text{suspensión}} = (0.0014 + 0.0069)\text{m}^3$$

$$V_{\text{suspensión}} = 0.0083\text{m}^3$$

c. Altura de la suspensión en el reactor:

Ya que el reactor era un cono truncado, la ecuación de volumen total es:

$$V_{\text{suspensión}} = \pi \int_0^h \left(\frac{5 * y}{66} + \frac{1}{8} \right)^2 dy$$

Donde:

y = Altura total del reactor

dy = Diferencial de altura

V = Volumen de suspensión

h = Altura ocupada por la suspensión

Entonces:

$$V_{\text{suspensión}} = \frac{h(3267 + 1980h + 400h^2)\pi}{209088}$$

Despejando h , se obtiene:

$$h = -\frac{33}{20} + \frac{311^{2/3}(11\pi^3 + 1280\pi^2 V_{\text{suspensión}})^{1/3}}{20\pi}$$

Sustituyendo el valor de $V_{\text{suspensión}}$:

$$h = -\frac{33}{20} + \frac{311^{2/3}(11\pi^3 + 1280\pi^2(0.0083\text{m}^3))^{1/3}}{20\pi}$$
$$h = 0.15402\text{m}$$

d. Fracción de volumen de sólidos en la suspensión debajo de Z'

Ecuación No. 11

$$\phi_{Sm} = \frac{\text{Volumen sólido}}{\text{volumen suspensión}}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

$$\phi_{Sm} = \frac{0.001365m^3 \text{ Hematita}}{0.008288m^3 \text{ Suspensión}} = 0.164734 \left(m^3 \text{ Hematita} / m^3 \text{ Suspensión} \right)$$

e. Densidad de la suspensión debajo de Z'

Ecuación No. 12

$$Pm = \phi_{Sm} \rho_p + (1 - \phi_{Sm}) \rho_L$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

$$\rho_m = 0.164734 * \left(\frac{2710\text{kg}}{m^3} \right) + (1 - 0.164734) \left(\frac{1234.6238\text{kg}}{m^3} \right)$$

$$\rho_m = 1477.6686 \frac{\text{kg}}{m^3}$$

f. Velocidad terminal de sedimentación

Ecuación No. 13

$$V_{tS} = \frac{gd_p^2 \Delta\rho}{18\mu_L}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

La viscosidad de la solución de ácido sulfúrico a 25°C es de 0.0019228 kg/m*s

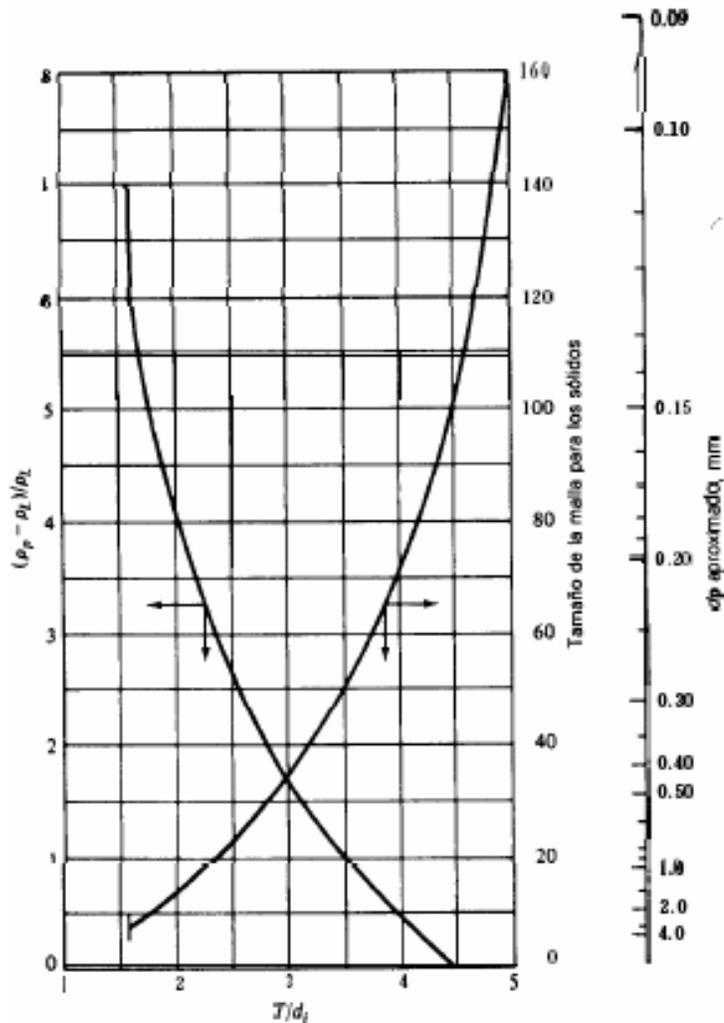
$$V_{tS} = \frac{(9.8m/s) * (0.000106m)^2 * ((2710 - 1234.62)\text{kg} / m^3)}{18 * (0.001922784\text{kg} * s)} = 0.004343 \frac{m}{s}$$

g. Determinación de la relación diámetro tanque / diámetro del impulsor

Dicha relación se determina en Figura 31:

$$\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} = \frac{(2710 - 1234.62) \text{kg} / \text{m}^3}{1234.62 \text{kg} / \text{m}^3} = 1.01501$$

Figura 31. Gráfica de la relación diámetro tanque/diámetro impulsor



Fuente. Referencia bibliografía No. 12

Este valor se encuentra en eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación T/di_1 de 3.5.

El tamaño de la partícula es de 0.106 mm este valor se busca en el eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación y un T/di_2 0.9.

El valor del diámetro (T) es de 0.273 m, por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{T}{di_1} &= 3.5 & \frac{T}{di_2} &= 3.5 \\ di_1 &= \frac{0.273m}{3.5} = 0.078096m & di_2 &= \frac{0.273m}{0.9} = 0.303707m \end{aligned}$$

Ecuación No. 14

$$di_{ipromedio} = \frac{di_1 + di_2}{2}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

Entonces:

$$di_{ipromedio} = \frac{(0.078096 + 0.303707)m}{2} = 0.190901m$$

h. Determinación de la potencia mínima:

Ecuación No. 15

$$\frac{Pg_c}{gn\rho_m v_m V_{tS}} = \phi_{Sm}^{\frac{2}{3}} \left(\frac{T}{d_i} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(4.35 \frac{Z'}{T} = 0.1 \right)$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

Sustituyendo valores en ecuación No. 15

$$\frac{P * 1}{9.8 * 3 * 1477.668582 * 0.008288 * 0.004343} = 0.164734^{\frac{2}{3}} *$$

$$\left(\frac{0.273336}{0.190901}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(4.35 * \frac{0.114018}{0.273336} - 0.1\right)$$

$$P = 3.1231 \text{ Watt}$$

i. Determinación de las revoluciones por minuto del agitador:

Ecuación No. 16

$$g_o P = P_o \rho_m D_i^5 N^3$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

Calculándose por ecuación No. 16. El número de Potencia (P_o) se asume de 1, las revoluciones por minuto serían:

$$N = \left(\frac{1 * 3.123084}{1 * 1477.668582 * (0.190901)^5}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$N = 2.03 \text{ rps}$$

$$N = 121.66 \text{ rpm}$$

El valor de las revoluciones por minuto debe dar un número de Reynolds del impulsor mayor a 1000. Si este es menor, deben modificarse las suposiciones.

j. Determinación del No. de Reynolds del impulsor:

Ecuación No. 17

$$\text{Re} = \frac{(d_i^2 * N * \rho_m)}{\mu_m}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

Donde:

- La viscosidad de la solución se calcula por medio de:

Ecuación No. 18

$$\mu_m = \frac{\mu_L}{\left(1 - \frac{\phi_{sm}}{\phi_{ss}}\right)^{1.8}}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 12

$$\mu_m = \frac{0.001923 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{\left(1 - \frac{0.164734}{0.6}\right)^{1.8}} = 0.003426 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Entonces Re es:

$$\text{Re} = \frac{(0.190901)^2 * 2.03 * 1477.668582}{0.003426} = 31866.76$$

- Ya que el valor de Re es mayor a 25,000, el valor de potencia obtenido no necesita correcciones.

De esta forma se efectúa para cada concentración de ácido.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

APÉNDICE 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

1. ANÁLISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES

Este análisis de varianza se emplea en un experimento de dos factores utilizando observaciones repetidas en un diseño completamente aleatorio, considerando el caso de n replicas de combinaciones de tratamiento determinadas por a niveles del factor A y b niveles del factor B . Cada combinación define una celda en un arreglo de la siguiente forma.

Tabla XXVIII. Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores

| A | B | | | | Total | Media |
|--------------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | | b | | |
| 1 | y_{111} | y_{121} | | y_{1b1} | $T_{1..}$ | y_1 |
| | y_{112} | | | y_{1b1} | | |
| | . | | | . | | |
| | . | | | . | | |
| 2 | y_{11n} | | | y_{1bn} | $T_{2..}$ | y_2 |
| | y_{211} | | | y_{2b1} | | |
| a | . | | | . | | y_n |
| | y_{a1n} | | | y_{abn} | | |
| Total | T_1 | T_2 | | T_b | $T_{...}$ | |
| Media | y_1 | y_2 | | y_b | | $y_{...}$ |

Fuente: Referencia bibliográfica No. 15

La finalidad de este estudio es comprobar cuál hipótesis es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, aceptando la hipótesis nula o las hipótesis alternativas. Para este análisis se emplean las siguientes ecuaciones:

Tabla XXIX. Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | <i>f</i> calculada |
|-------------------------------|---|--------------------|---|------------------------------|
| Concentración de ácido | $SSA = \frac{\sum_{i=1}^a T_{i..}^2}{bn} - \frac{T^2 \dots}{abn}$ | $a - 1$ | $S_1^2 = \frac{SSA}{a - 1}$ | $f_1 = \frac{S_1^2}{s^2}$ |
| Tiempo de reacción | $SSB = \frac{\sum_{j=1}^b T_{j..}^2}{an} - \frac{T^2 \dots}{abn}$ | $b - 1$ | $S_2^2 = \frac{SSB}{b - 1}$ | $f_2 = \frac{S_2^2}{s^2}$ |
| Interrelación | $SS(AB) = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij..}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^a T_{i..}^2}{bn} - \frac{\sum_{j=1}^b T_{j..}^2}{an} + \frac{T^2 \dots}{abn}$ | $(a - 1)(b - 1)$ | $S_3^2 = \frac{SS(AB)}{(a - 1)(b - 1)}$ | $f_1 = \frac{S_{31}^2}{s^2}$ |
| Error | $SSE = SST - SSA - SSB - SS(AB)$ | $ab(n - 1)$ | $S^2 = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$ | |
| Total | $SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{T^2 \dots}{abn}$ | $N - 1$ | | |

Fuente: Referencia bibliográfica No. 15

Empleando un análisis de varianza de dos factores (concentración de ácido y tiempo) con un nivel de significancia de 0.05 se buscó probar las siguientes hipótesis:

H_0 : No existe diferencia en la extracción de Fe(III) al emplear distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido)

H_0' : No existe diferencia en la extracción de Fe(III) en función del tiempo de reacción.

H_0'' : No existe interacción entre la concentración de solvente extractor y los tiempos de reacción.

H_1 : Al menos una de las C_i 's no es igual a cero

H_1' : Al menos una de las t_j 's no es igual a cero

H_1'' : Al menos una de las $(Ct)_{ij}$'s no es igual a cero

= 0.05

Regiones críticas: a) $f > 3.89$, b) $f > 3.49$, c) $f < 3.00$

Las f tabuladas se obtuvieron con base en las tablas de la referencia No. 14.

Para determinar cuál de las tres concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) y tiempo de reacción es preferible, se determinó la cantidad de extracción de Fe(III), analizando muestras en cuatro tiempos distintos. En el experimento se obtuvieron observaciones duplicadas de extracción de Fe(III) en cada combinación de tratamientos.

Con base en la tabla XXX se creó la tabla de totales (XXXI) y la tabla de fuentes de variación (XXXII):

Tabla XXX. **Datos de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso , empleando tres concentraciones de solvente extractor en función del tiempo**

| Concentración de ácido sulfúrico | Tiempo de reacción | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| | t1 | t2 | t3 | t4 |
| C1 | 1.1491 | 1.6364 | 1.8365 | 2.3808 |
| | 1.1461 | 1.6307 | 1.8267 | 2.3831 |
| C2 | 1.1601 | 1.5577 | 1.8343 | 1.8663 |
| | 1.1538 | 1.5597 | 1.8346 | 1.8731 |
| C3 | 0.8569 | 1.0696 | 1.2577 | 1.2947 |
| | 0.8585 | 1.0833 | 1.2508 | 1.2978 |

Fuente: Apéndice 4. Datos calculados, tabla XLII

Tabla XXXI. **Datos intermedios totales de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso, empleando distintas concentraciones de solvente extractor en función del tiempo**

| Concentración de ácido sulfúrico | Tiempo de reacción | | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------|--------|---------|---------|
| | t1 | t2 | t3 | t4 | TOTAL |
| C1 | 2.2956 | 3.2475 | 3.6640 | 4.7660 | 13.9732 |
| C2 | 2.3139 | 3.1174 | 3.6689 | 3.7394 | 12.8396 |
| C3 | 1.7155 | 2.1529 | 2.5086 | 2.5926 | 8.9695 |
| TOTAL | 6.3250 | 8.5179 | 9.8414 | 11.0981 | 35.7823 |

Fuente: Apéndice 3. Análisis estadístico, tabla XXXIX

Tabla XXXII. **Fuentes de variación de extracción de Fe(III) en porcentaje en peso , empleando distintas concentraciones de solvente extractor en función del tiempo**

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | f calculada | f tabulada |
|---|-------------------|--------------------|----------------|-------------|------------|
| Concentración de ácido sulfúrico | 1.7208 | 2.0000 | 0.8604 | 1302.3800 | > 3.89 |
| Tiempo de reacción | 2.0810 | 3.0000 | 0.6937 | 1050.0345 | > 3.49 |
| Interrelación | 0.3817 | 6.0000 | 0.0636 | 96.2964 | < 3.00 |
| Error | 0.0079 | 12.0000 | 0.0007 | | |
| TOTAL | 4.1914 | 23.0000 | | | |

Fuente: Apéndice 3. Análisis estadístico, tabla XXX

Con base en esto se concluye que:

H_1 : Sí existe diferencia en la extracción de Fe(III) al emplear distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido)

H_1' : Sí existe diferencia en la extracción de Fe(III) en función del tiempo de reacción.

H_1'' : Sí existe interacción entre la concentración de solvente extractor y los tiempos de reacción.

Y por lo tanto existe variación significativa en el porcentaje de extracción de hierro (III), a partir de hematita mediante el cambio en la concentración de solvente extractivo (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo.

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

APÉNDICE 4. DATOS ORIGINALES

Tabla XXXIII. Extracción de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) empleando tres concentraciones de solvente extract or ácido sulfúrico, en función del tiempo

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | |
|---|--------------------------|---|--------|
| | | C1 | C2 |
| 20 | 30 | 142.88 | 142.50 |
| | 60 | 212.17 | 214.05 |
| | 90 | 242.19 | 240.90 |
| | 120 | 315.18 | 315.48 |
| 25 | 30 | 155.35 | 154.50 |
| | 60 | 208.75 | 209.02 |
| | 90 | 246.00 | 246.04 |
| | 120 | 250.68 | 251.59 |
| 30 | 30 | 119.99 | 120.21 |
| | 60 | 149.99 | 151.90 |
| | 90 | 177.13 | 176.16 |
| | 120 | 183.92 | 184.36 |

Fuente: Laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Anexo 2)

Tabla XXXIV. Densidad de la solución de sulfato férrico empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico, en función del tiempo

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Densidad de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | |
|---|--------------------------|--|--------|
| | | C1 | C2 |
| 20 | 30 | 1.2617 | 1.2251 |
| | 60 | 1.2943 | 1.3310 |
| | 90 | 1.3014 | 1.3360 |
| | 120 | 1.2953 | 1.3523 |
| 25 | 30 | 1.3452 | 1.3330 |
| | 60 | 1.3330 | 1.3473 |
| | 90 | 1.3422 | 1.3401 |
| | 120 | 1.3411 | 1.3452 |
| 30 | 30 | 1.3941 | 1.4063 |
| | 60 | 1.4002 | 1.4043 |
| | 90 | 1.4104 | 1.4063 |
| | 120 | 1.4134 | 1.4277 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XXXIX

Tabla XXXV. pH de la solución de sulfato férrico empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico, en función del tiempo

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | pH de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ | |
|---|--------------------------|---|-------|
| | | C1 | C2 |
| 20 | 30 | 0.11 | 0.13 |
| | 60 | 0.23 | 0.27 |
| | 90 | 0.27 | 0.25 |
| | 120 | 0.26 | 0.28 |
| 25 | 30 | 0.09 | 0.11 |
| | 60 | 0.22 | 0.20 |
| | 90 | 0.23 | 0.21 |
| | 120 | 0.26 | 0.24 |
| 30 | 30 | -0.04 | -0.06 |
| | 60 | 0.06 | 0.02 |
| | 90 | 0.05 | 0.07 |
| | 120 | 0.25 | 0.23 |

Fuente: Experimental

Tabla XXXVI. Extracción de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) empleando ácido sulfúrico al 20%, en función del tiempo

| Tiempo de reacción (min) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | |
|--------------------------|---|--------|
| | C1 | C2 |
| 0.5 | 146.37 | 145.70 |
| 1 | 181.46 | 180.45 |
| 1.5 | 222.12 | 221.25 |
| 2 | 298.46 | 297.45 |
| 3 | 398.46 | 397.46 |
| 7 | 584.79 | 583.12 |
| 12 | 839.46 | 838.46 |

Fuente: Laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Anexo 3)

Tabla XXXVII. **Densidad de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20%, en función del tiempo**

| Tiempo de reacción (min) | Densidad de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | |
|--------------------------|--|--------|
| | C1 | C2 |
| 0.5 | 1.2548 | 1.263 |
| 1 | 1.2804 | 1.2776 |
| 1.5 | 1.2801 | 1.2997 |
| 2 | 1.3178 | 1.3378 |
| 3 | 1.3389 | 1.3523 |
| 7 | 1.4201 | 1.4155 |
| 12 | 1.5321 | 1.5217 |

Fuente: Apéndice 5. Datos calculados, tabla XLVII

Tabla XXXVIII. **pH de la solución de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo**

| Tiempo de reacción (min) | pH de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ | |
|--------------------------|---|------|
| | C1 | C2 |
| 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 1 | 0.27 | 0.23 |
| 1.5 | 0.26 | 0.3 |
| 2 | 0.33 | 0.31 |
| 3 | 0.53 | 0.49 |
| 7 | 0.82 | 0.84 |
| 12 | 1.03 | 0.99 |

Fuente: Experimental

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

APÉNDICE 5. DATOS CALCULADOS

Tabla XXXIX. Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico , empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido (% en volumen) | Volumen picnómetro (ml) | Masa de solución (g) | | | Densidad (g/ml) | | | Densidad (g/l) |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|------|-----------|-----------------|------|-----------|----------------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} | C1 | C2 | \bar{X} | \bar{X} |
| 20 | 0.982 | 1.22 | 1.24 | 1.20 | 1.26 | 1.23 | 1.24 | 1243.38 |
| | 0.982 | 1.29 | 1.27 | 1.31 | 1.29 | 1.33 | 1.31 | 1312.63 |
| | 0.982 | 1.30 | 1.28 | 1.31 | 1.30 | 1.34 | 1.32 | 1318.74 |
| | 0.982 | 1.30 | 1.27 | 1.33 | 1.30 | 1.35 | 1.32 | 1323.83 |
| 25 | 0.982 | 1.32 | 1.32 | 1.31 | 1.35 | 1.33 | 1.34 | 1339.10 |
| | 0.982 | 1.32 | 1.31 | 1.32 | 1.33 | 1.35 | 1.34 | 1340.12 |
| | 0.982 | 1.32 | 1.32 | 1.32 | 1.34 | 1.34 | 1.34 | 1341.14 |
| | 0.982 | 1.32 | 1.32 | 1.32 | 1.34 | 1.35 | 1.34 | 1343.18 |
| 30 | 0.982 | 1.38 | 1.37 | 1.38 | 1.39 | 1.41 | 1.40 | 1400.20 |
| | 0.982 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.40 | 1.40 | 1.40 | 1402.24 |
| | 0.982 | 1.38 | 1.39 | 1.38 | 1.41 | 1.41 | 1.41 | 1408.35 |
| | 0.982 | 1.40 | 1.39 | 1.40 | 1.41 | 1.43 | 1.42 | 1420.57 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 2

Tabla XL. Datos del cálculo de la recuperación de Fe(II) en solución (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido (% en volumen) | Fe (III) en solución diluida ((mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | | Factor de dilución | Fe (III) en solución real (mg/l) | Fe (III) en solución real (g/l) | Porcentaje en peso de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) |
|---------------------------------------|---|--------|-----------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| | C1 | C2 | \bar{X} | | | | |
| 20 | 142.88 | 142.50 | 142.69 | 100 | 14268.82 | 14.27 | 1.15 |
| | 212.17 | 214.05 | 213.11 | 100 | 21311.07 | 21.31 | 1.62 |
| | 242.19 | 240.90 | 241.54 | 100 | 24154.19 | 24.15 | 1.83 |
| | 315.18 | 315.48 | 315.33 | 100 | 31532.85 | 31.53 | 2.38 |
| 25 | 155.35 | 154.50 | 154.92 | 100 | 15492.34 | 15.49 | 1.16 |
| | 208.75 | 209.02 | 208.88 | 100 | 20888.13 | 20.89 | 1.56 |
| | 246.00 | 246.04 | 246.02 | 100 | 24602.23 | 24.60 | 1.83 |
| | 250.68 | 251.59 | 251.14 | 100 | 25113.65 | 25.11 | 1.87 |
| 30 | 119.99 | 120.21 | 120.10 | 100 | 12009.95 | 12.01 | 0.86 |
| | 149.99 | 151.90 | 150.95 | 100 | 15094.59 | 15.09 | 1.08 |
| | 177.13 | 176.16 | 176.65 | 100 | 17664.79 | 17.66 | 1.25 |
| | 183.92 | 184.36 | 184.14 | 100 | 18414.24 | 18.41 | 1.30 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 3

Tabla XLI. Extracción promedio de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | |
|---|--------------------------|---|--------|-----------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} |
| 20 | 30 | 142.88 | 142.50 | 142.69 |
| | 60 | 212.17 | 214.05 | 213.11 |
| | 90 | 242.19 | 240.90 | 241.54 |
| | 120 | 315.18 | 315.48 | 315.33 |
| 25 | 30 | 155.35 | 154.50 | 154.92 |
| | 60 | 208.75 | 209.02 | 208.88 |
| | 90 | 246.00 | 246.04 | 246.02 |
| | 120 | 250.68 | 251.59 | 251.14 |
| 30 | 30 | 119.99 | 120.21 | 120.10 |
| | 60 | 149.99 | 151.90 | 150.95 |
| | 90 | 177.13 | 176.16 | 176.65 |
| | 120 | 183.92 | 184.36 | 184.14 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla XLII. Extracción promedio de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | |
|---|--------------------------|--|------|-----------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} |
| 20 | 30 | 1.15 | 1.15 | 1.15 |
| | 60 | 1.62 | 1.63 | 1.62 |
| | 90 | 1.84 | 1.83 | 1.83 |
| | 120 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| 25 | 30 | 1.16 | 1.15 | 1.16 |
| | 60 | 1.56 | 1.56 | 1.56 |
| | 90 | 1.83 | 1.83 | 1.83 |
| | 120 | 1.87 | 1.87 | 1.87 |
| 30 | 30 | 0.86 | 0.86 | 0.86 |
| | 60 | 1.07 | 1.08 | 1.08 |
| | 90 | 1.26 | 1.25 | 1.25 |
| | 120 | 1.29 | 1.30 | 1.30 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla XLIII. Densidad promedio de la solución de sulfato férrico, empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | Densidad de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | | |
|---|--------------------------|--|--------|-----------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} |
| 20 | 30 | 1.2617 | 1.2251 | 1.2434 |
| | 60 | 1.2943 | 1.3310 | 1.3126 |
| | 90 | 1.3014 | 1.3360 | 1.3187 |
| | 120 | 1.2953 | 1.3523 | 1.3238 |
| 25 | 30 | 1.3452 | 1.3330 | 1.3391 |
| | 60 | 1.3330 | 1.3473 | 1.3401 |
| | 90 | 1.3422 | 1.3401 | 1.3411 |
| | 120 | 1.3411 | 1.3452 | 1.3432 |
| 30 | 30 | 1.3941 | 1.4063 | 1.4002 |
| | 60 | 1.4002 | 1.4043 | 1.4022 |
| | 90 | 1.4104 | 1.4063 | 1.4084 |
| | 120 | 1.4134 | 1.4277 | 1.4206 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla XLIV. pH promedio de la solución de sulfato férrico, empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido sulfúrico (% en volumen) | Tiempo de reacción (min) | pH de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | | |
|---|--------------------------|--|-------|-----------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} |
| 20 | 30 | 0.11 | 0.13 | 0.12 |
| | 60 | 0.23 | 0.27 | 0.25 |
| | 90 | 0.27 | 0.25 | 0.26 |
| | 120 | 0.26 | 0.28 | 0.27 |
| 25 | 30 | 0.09 | 0.11 | 0.1 |
| | 60 | 0.22 | 0.20 | 0.21 |
| | 90 | 0.23 | 0.21 | 0.22 |
| | 120 | 0.26 | 0.24 | 0.25 |
| 30 | 30 | -0.04 | -0.06 | -0.05 |
| | 60 | 0.06 | 0.02 | 0.04 |
| | 90 | 0.05 | 0.07 | 0.06 |
| | 120 | 0.25 | 0.23 | 0.24 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla XLV. Datos del cálculo de la cantidad de Fe(III) lixiviado , empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido (% en volumen) | Análisis de laboratorio porcentaje promedio de recuperación Fe(III) (g Fe(III)/ g ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)) | Masa de solución de sulfato férrico (g) | Fe(III) lixiviado | |
|---------------------------------------|---|---|-------------------|-------|
| | | | (g) | % |
| 20 | 1.15 | 8972.01 | 102.96 | 10.65 |
| | 1.62 | 8972.01 | 145.66 | 15.06 |
| | 1.83 | 8972.01 | 164.33 | 16.99 |
| | 2.38 | 8972.01 | 213.71 | 22.10 |
| 25 | 1.16 | 7587.48 | 87.78 | 9.08 |
| | 1.56 | 7587.48 | 118.26 | 12.23 |
| | 1.83 | 7587.48 | 139.19 | 14.39 |
| | 1.87 | 7587.48 | 141.86 | 14.67 |
| 30 | 0.86 | 6664.45 | 57.16 | 5.91 |
| | 1.08 | 6664.45 | 71.74 | 7.42 |
| | 1.25 | 6664.45 | 83.59 | 8.64 |
| | 1.30 | 6664.45 | 86.39 | 8.93 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 4

Tabla XLVI. Datos del cálculo del porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III) , empleando tres concentraciones de solvente extractor ácido sulfúrico

| Concentración de ácido (% en volumen) | Fe(III) lixiviado (g) | Fe(III) total presente en hematita (g) | Eficiencia respecto al agotamiento máximo posible (%) | Análisis de laboratorio porcentaje promedio de recuperación Fe(III) (g Fe(III)/ g $(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)$) | Porcentaje promedio de recuperación teórico mínimo de Fe(III) según la AWWA (g Fe(III)/ g $(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)$) (%) | Eficiencia respecto a la cantidad mínima estipulada por la AWWA (g) |
|---------------------------------------|-----------------------|--|---|--|--|---|
| 20 | 102.96 | 967.1 | 10.65 | 1.15 | 9 | 12.75 |
| | 145.66 | 967.1 | 15.06 | 1.62 | 9 | 18.04 |
| | 164.33 | 967.1 | 16.99 | 1.83 | 9 | 20.35 |
| | 213.71 | 967.1 | 22.10 | 2.38 | 9 | 26.47 |
| 25 | 87.78 | 967.1 | 9.10 | 1.16 | 9 | 12.85 |
| | 118.26 | 967.1 | 12.26 | 1.56 | 9 | 17.32 |
| | 139.19 | 967.1 | 14.43 | 1.83 | 9 | 20.38 |
| | 141.86 | 967.1 | 14.71 | 1.87 | 9 | 20.77 |
| 30 | 57.16 | 967.1 | 5.91 | 0.86 | 9 | 9.53 |
| | 71.74 | 967.1 | 7.42 | 1.08 | 9 | 11.96 |
| | 83.59 | 967.1 | 8.64 | 1.25 | 9 | 13.94 |
| | 86.39 | 967.1 | 8.93 | 1.30 | 9 | 14.40 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 5

Tabla XLVII. Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico , empleando ácido sulfúrico al 20%

| Tiempo (horas) | Volumen picnómetro (ml) | Masa de solución (g) | | | Densidad (g/ml) | | | Densidad (g/l) |
|----------------|-------------------------|----------------------|------|-----------|-----------------|------|-----------|----------------|
| | | C1 | C2 | \bar{X} | C1 | C2 | \bar{X} | \bar{X} |
| 0.5 | 0.982 | 1.23 | 1.24 | 1.24 | 1.25 | 1.26 | 1.26 | 1258.90 |
| 1 | 0.982 | 1.26 | 1.25 | 1.26 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1279.00 |
| 1.5 | 0.982 | 1.26 | 1.28 | 1.27 | 1.28 | 1.30 | 1.29 | 1289.90 |
| 2 | 0.982 | 1.29 | 1.31 | 1.30 | 1.32 | 1.34 | 1.33 | 1327.80 |
| 3 | 0.982 | 1.31 | 1.33 | 1.32 | 1.34 | 1.35 | 1.35 | 1345.60 |
| 7 | 0.982 | 1.39 | 1.39 | 1.39 | 1.42 | 1.42 | 1.42 | 1417.80 |
| 12 | 0.982 | 1.50 | 1.49 | 1.50 | 1.53 | 1.52 | 1.53 | 1526.90 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 2

Tabla XLVIII. Datos del cálculo de la recuperación de Fe(III) en solución (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20%

| Fe (III) en solución diluida ((mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | | Factor de dilución | Fe (III) en solución real (mg/l) | Fe (III) en solución real (g/l) | Porcentaje en peso de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) |
|---|--------|-----------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| C1 | C2 | \bar{X} | | \bar{X} | \bar{X} | \bar{X} |
| 146.37 | 145.70 | 146.03 | 100 | 14603.39 | 14.60 | 1.16 |
| 181.46 | 180.45 | 180.95 | 100 | 18095.45 | 18.10 | 1.41 |
| 222.12 | 221.25 | 221.68 | 100 | 22168.35 | 22.17 | 1.72 |
| 298.46 | 297.45 | 297.95 | 100 | 29795.40 | 29.80 | 2.24 |
| 398.46 | 397.46 | 397.96 | 100 | 39795.69 | 39.80 | 2.96 |
| 584.79 | 583.12 | 583.95 | 100 | 58395.50 | 58.40 | 4.12 |
| 839.46 | 838.46 | 838.96 | 100 | 83895.89 | 83.90 | 5.49 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 3

Tabla XLIX. Extracción promedio de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20%

| Tiempo de reacción (horas) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (mg Fe(III)/ l $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | |
|----------------------------|---|--------|-----------|
| | C1 | C2 | \bar{X} |
| 0.5 | 146.37 | 145.70 | 146.03 |
| 1 | 181.46 | 180.45 | 180.95 |
| 1.5 | 222.12 | 221.25 | 221.68 |
| 2 | 298.46 | 297.45 | 297.95 |
| 3 | 398.46 | 397.46 | 397.96 |
| 7 | 584.79 | 583.12 | 583.95 |
| 12 | 839.46 | 838.46 | 838.96 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla L. Extracción promedio de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), empleando ácido sulfúrico al 20%

| Tiempo de reacción (horas) | Porcentaje en peso de recuperación de Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | | |
|----------------------------|--|------|-----------|
| | C1 | C2 | \bar{X} |
| 0.5 | 1.16 | 1.16 | 1.16 |
| 1 | 1.42 | 1.41 | 1.41 |
| 1.5 | 1.72 | 1.72 | 1.72 |
| 2 | 2.25 | 2.24 | 2.24 |
| 3 | 2.96 | 2.95 | 2.96 |
| 7 | 4.12 | 4.11 | 4.12 |
| 12 | 5.50 | 5.49 | 5.49 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla LI. Densidad promedio de la solución de sulfato férrico , empleando ácido sulfúrico al 20%

| Tiempo de reacción (horas) | Densidad de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | | |
|----------------------------|--|--------|-----------|
| | C1 | C2 | \bar{X} |
| 0.5 | 1.2548 | 1.263 | 1.2589 |
| 1 | 1.2804 | 1.2776 | 1.279 |
| 1.5 | 1.2801 | 1.2997 | 1.2899 |
| 2 | 1.3178 | 1.3378 | 1.3278 |
| 3 | 1.3389 | 1.3523 | 1.3456 |
| 7 | 1.4201 | 1.4155 | 1.4178 |
| 12 | 1.5321 | 1.5217 | 1.5269 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla LII. pH promedio de la solución de sulfato férrico , empleando ácido sulfúrico al 20%

| Tiempo de reacción (horas) | pH de la solución de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (g/ml) | | |
|----------------------------|--|------|-----------|
| | C1 | C2 | \bar{X} |
| 0.5 | 0.12 | 0.14 | 0.13 |
| 1 | 0.27 | 0.23 | 0.25 |
| 1.5 | 0.26 | 0.3 | 0.28 |
| 2 | 0.33 | 0.31 | 0.32 |
| 3 | 0.53 | 0.49 | 0.51 |
| 7 | 0.82 | 0.84 | 0.83 |
| 12 | 1.03 | 0.99 | 1.01 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 1

Tabla LIII. Datos del cálculo de la cantidad de Fe(III) lixiviado , empleando ácido sulfúrico al 20%

| Concentración de ácido (% en volumen) | Análisis de laboratorio porcentaje promedio de recuperación Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | Masa de solución de sulfato férrico (g) | Fe(III) lixiviado | |
|---------------------------------------|--|---|-------------------|-------|
| | | | (g) | % |
| 0.5 | 1.16 | 8972.01 | 104.08 | 10.76 |
| 1 | 1.41 | 8972.01 | 126.51 | 13.08 |
| 1.5 | 1.72 | 8972.01 | 154.32 | 15.96 |
| 2 | 2.24 | 8972.01 | 200.97 | 20.78 |
| 3 | 2.96 | 8972.01 | 265.57 | 27.46 |
| 7 | 4.12 | 8972.01 | 369.65 | 38.22 |
| 12 | 5.49 | 8972.01 | 492.56 | 50.93 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 4

Tabla LIV. Datos del cálculo del porcentaje de eficiencia en la extracción de Fe(III), empleando ácido sulfúrico al 20%

| Concentración de ácido (% en volumen) | Fe(III) lixiviado (g) | Fe(III) total presente en hematita (g) | Eficiencia respecto al agotamiento máximo posible (%) | Análisis de laboratorio porcentaje promedio de recuperación Fe(III) (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) | Porcentaje promedio de recuperación teórico mínimo de Fe(III) según la AWWA (g Fe(III)/ g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) (%) | Eficiencia respecto a la cantidad mínima estipulada por la AWWA (g) |
|---------------------------------------|-----------------------|--|---|--|--|---|
| 0.5 | 104.08 | 967.1 | 10.76 | 1.16 | 9 | 12.89 |
| 1 | 126.51 | 967.1 | 13.08 | 1.41 | 9 | 15.67 |
| 1.5 | 154.32 | 967.1 | 15.96 | 1.72 | 9 | 19.11 |
| 2 | 200.97 | 967.1 | 20.78 | 2.24 | 9 | 24.89 |
| 3 | 265.57 | 967.1 | 27.46 | 2.96 | 9 | 32.89 |
| 7 | 369.65 | 967.1 | 38.22 | 4.12 | 9 | 45.78 |
| 12 | 492.56 | 967.1 | 50.93 | 5.49 | 9 | 61.00 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 5

Tabla LV. **Tiempo máximo de agotamiento de Fe(III) por lixiviación , para las condiciones experimentales realizadas**

| Tiempo de reacción (horas) | Porcentaje en peso de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/g($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)) |
|----------------------------|---|
| 31.47 | 9.00 |
| 44.74 | 10.78 |

Fuente: Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 6

Tabla LVI. **Características físicas de la hematita**

| Tamaño de lote de hematita – Ss (kg) | Densidad de hematita (kg/m^3) | Diámetro de partícula (d_p) | | |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|----------|-------|
| | | μm | m | mm |
| 3.700 | 2710 | 106.00 | 0.000106 | 0.106 |

Fuente. Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 7

Tabla LVII. **Características físicas de las soluciones de ácido sulfúrico**

| Concentración de H_2SO_4 (%Vol.) | Densidad (kg/m^3) | Viscosidad | |
|--|------------------------------|------------|-------------------------|
| | | cP | $\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| 20 | 1234.6238 | 1.9228 | 0.001923 |
| 25 | 1291.7114 | 1.5986 | 0.001599 |
| 30 | 1344.9072 | 1.3290 | 0.001329 |

Fuente. Metodología

Tabla LVIII. **Dimensiones de reactor**

| Reactor | | | | |
|--------------------|--------------------|------------|--------------------------|-----------------------------|
| Radio inferior (m) | Radio superior (m) | Altura (m) | Volumen (m^3) | Altura al propulsor (C) (m) |
| 0.125 | 0.15 | 0.33 | 0.0196546 | 0.04 |

Fuente. Metodología

Tabla LIX. **Volumen y altura de operación para cada concentración de ácido sulfúrico**

| Concentración de H_2SO_4 (%Vol.) | Volumen de solvente (m^3) | Volumen de hematita (m^3) | Volumen total - V_m (m^3) | Altura Ocupada en el reactor - h (m) | Diámetro ocupado en el reactor - T (m) | Z' (h-C) |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|------------|
| 20 | 0.0069 | 0.0014 | 0.0083 | 0.1540 | 0.2733 | 0.1140 |
| 25 | 0.0055 | 0.0014 | 0.0069 | 0.1300 | 0.1349 | 0.0900 |
| 30 | 0.0046 | 0.0014 | 0.0060 | 0.1138 | 0.1336 | 0.0738 |

Fuente. Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 7

Tabla LX. Datos intermedios para la determinación de potencia, según la concentración de solución de ácido sulfúrico utilizado

| Concentración de H_2SO_4 (%Vol.) | Relación sólido/líquido (kg/L) | Relación s_m | Densidad de suspensión - ρ_m (Kg/m^3) | Velocidad terminal de Sedimentación - V_{ts} (m/s) | Relación de densidades | t/di_1 | t/di_2 |
|--|--------------------------------|----------------|---|--|------------------------|----------|----------|
| 20 | 2.6189 | 0.1647 | 1477.6686 | 0.0043 | 1.0150 | 3.50 | 0.90 |
| 25 | 2.6189 | 0.1979 | 1572.4132 | 0.0054 | 1.0980 | 3.45 | 0.85 |
| 30 | 2.6189 | 0.2283 | 1656.5535 | 0.0068 | 1.1950 | 3.40 | 0.80 |

Fuente. Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 7

Tabla LXI. Valores de potencia, No. de revoluciones de propulsor, viscosidad de solución y No. Reynolds para cada concentración de ácido sulfúrico

| di_1 (m) | di_2 (m) | d_i (m) | Potencia (Watt) | No. de revoluciones del propulsor - N | | Viscosidad de la solución - μ_m ($\text{kg/m}^*\text{s}$) | Re |
|------------|------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|----------|---|------------|
| | | | | (rps) | (rpm) | | |
| 0.0781 | 0.3037 | 0.1909 | 3.1231 | 2.0276 | 121.6574 | 0.0034 | 31866.7621 |
| 0.0391 | 0.1586 | 0.0989 | 11.3333 | 9.1379 | 548.2713 | 0.0033 | 42744.4749 |
| 0.0393 | 0.1670 | 0.1032 | 8.4091 | 7.5736 | 454.4170 | 0.0031 | 42433.5809 |

Fuente. Apéndice 2. Muestra de cálculo, sección 7

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

APÉNDICE 6. FOTOGRAFÍAS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Figura 32. Preparación de lote de hematita



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 33. Preparación de solución de H_2SO_4 .



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 34. Inicio de reacción



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 35. Proceso de agitación.



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 36. **Recolección de muestras en solución para análisis de laboratorio**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

Figura 37. **Filtración de muestras a nivel laboratorio**



Fuente: Laboratorio de química, USAC

Figura 38. Solución de sulfato férrico filtrada



Fuente: Laboratorio de química, USAC

Figura 39. Equipo para medición de pH y densidad de las muestras



Fuente: Laboratorio de química, USAC

Figura 40. Proceso de filtración a nivel planta piloto con filtro prensa



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias, USAC

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIERRO (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -, POR
LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA "QUEBRADA MARÍA",
CAMOTÁN, CHIQUIMULA

ANEXO 2. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRAS DE SULFATO FÉRRICO, EMPLEANDO TRES CONCENTRACIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Tabla LXII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 30min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 1346.5374 | 0.0000 | Si | 1246.5474 | 0.0000 |
| S | 37505.7188 | 0.0000 | S | 36505.7188 | 0.0000 |
| Ar | 231.4965 | No Detectable | Ar | 231.4965 | No Detectable |
| K | 1509.9366 | 4.3574 | K | 1409.9366 | 4.3674 |
| Ca | 1501.5338 | 5.3307 | Ca | 1501.5338 | 5.3307 |
| Cr | 279.8409 | 0.4254 | Cr | 269.8409 | 0.4154 |
| Cr | 298.1887 | 0.4532 | Cr | 298.1787 | 0.4632 |
| Fe | 127657.3516 | 142.8882 | Fe | 127559.3516 | 142.5004 |
| Zn | 18899.4023 | 24.4210 | Zn | 18899.4022 | 24.4210 |
| Y | 1855.0765 | 5.0000 | Y | 1855.0765 | 5.0000 |
| Rh | 733.1279 | No Detectable | Rh | 733.1279 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 60 min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| S | 28999.2656 | 0.0000 | S | 28899.2656 | 0.0000 |
| Ar | 278.1721 | 0.0000 | Ar | 288.1731 | 0.0000 |
| Cr | 342.8135 | 0.4924 | Cr | 342.8135 | 0.4924 |
| Fe | 201756.5156 | 212.1700 | Fe | 201876.5156 | 214.0505 |
| Zn | 12574.6572 | 15.3549 | Zn | 12574.6572 | 15.3549 |
| Y | 1962.0277 | 5.0000 | Y | 1963.0277 | 5.0000 |
| Rh | 829.8481 | No Detectable | Rh | 819.8481 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXIV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 90min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 2013.2827 | 0.0000 | Si | 2013.2827 | 0.0000 |
| S | 6344.1128 | 0.0000 | S | 6344.1128 | 0.0000 |
| Ca | 562.9722 | 12.6066 | Ca | 562.9722 | 12.6066 |
| Fe | 34259.9102 | 242.1900 | Fe | 34259.9102 | 240.9060 |
| Zn | 2434.0442 | 19.8385 | Zn | 2434.0442 | 19.8385 |
| Y | 294.1019 | 5.0000 | Y | 294.1019 | 5.0000 |
| Ru | 129.1899 | No Detectable | Ru | 129.1899 | No Detectable |
| Rh | 1286.4552 | No Detectable | Rh | 1286.4552 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 120min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|------------|---------------|----------------------------|------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| Fe | 67436.5781 | 315.18 | Fe | 67437.9856 | 315.48 |
| Zn | 2935.5857 | 17.4573 | Zn | 2945.5857 | 17.4673 |
| Zn | 2975.2859 | 17.6934 | Zn | 2945.2859 | 17.6954 |
| Y | 403.0834 | 5.0000 | Y | 403.0834 | 5.0000 |
| Ru | 641.3408 | No Detectable | Ru | 741.3408 | No Detectable |
| Rh | 2241.0408 | No Detectable | Rh | 2341.0408 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXVI. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 30min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 3589.3601 | 0.0000 | Si | 3589.3601 | 0.0000 |
| S | 5957.0850 | 0.0000 | S | 5957.0850 | 0.0000 |
| Ar | 271.1050 | No Detectable | Ar | 271.1050 | No Detectable |
| Fe | 22194.2168 | 154.5000 | Fe | 22198.2859 | 155.3505 |
| Zn | 2988.7319 | 24.1178 | Zn | 2988.7319 | 24.1178 |
| Y | 297.0483 | 5.0000 | Y | 297.0483 | 5.0000 |
| Rh | 2501.1797 | No Detectable | Rh | 2501.1797 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXVII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 25%, 60min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|------------|---------------|----------------------------|------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO | | | ELEMENTO | | |
| ÁREA | | | ÁREA | | |
| CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | |
| Si | 1672.6210 | 0.0000 | Si | 1672.6210 | 0.0000 |
| S | 7440.0054 | 0.0000 | S | 7440.0054 | 0.0000 |
| Ar | 705.3879 | No Detectable | Ar | 705.3879 | No Detectable |
| Cr | 120.4340 | 0.6861 | Cr | 120.4340 | 0.6861 |
| Fe | 49862.9180 | 208.8813 | Fe | 49872.7765 | 208.75 |
| Zn | 3875.1082 | 18.7663 | Zn | 3875.1082 | 18.7663 |
| Y | 494.9739 | 5.0000 | Y | 494.9739 | 5.0000 |
| Rh | 197.9914 | No Detectable | Rh | 197.9914 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXVIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 90min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|-------------|---------------|----------------------------|-------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO | | | ELEMENTO | | |
| ÁREA | | | ÁREA | | |
| CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | |
| Si | 3589.4978 | 0.0000 | Si | 3589.4988 | 0.0000 |
| S | 38918.4648 | 0.0000 | S | 38918.4668 | 0.0000 |
| Ar | 291.3838 | No Detectable | Ar | 291.3838 | No Detectable |
| Ca | 2380.9719 | 10.2089 | Ca | 2380.9819 | 10.2099 |
| Cr | 299.6779 | 0.5501 | Cr | 299.7779 | 0.5551 |
| Cr | 290.4862 | 0.5333 | Cr | 290.4862 | 0.5333 |
| Fe | 182245.4531 | 246.0223 | Fe | 182265.4531 | 246.0400 |
| Zn | 14821.7148 | 23.1307 | Zn | 14821.7148 | 23.1307 |
| Y | 1535.9828 | 5.0000 | Y | 1535.9828 | 5.0000 |
| Rh | 1658.8171 | No Detectable | Rh | 1758.1258 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXIX. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 120min**

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO | ÁREA | | ELEMENTO | ÁREA | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 3889.4978 | 0.0000 | Si | 3589.4988 | 0.0000 |
| S | 3888.4648 | 0.0000 | S | 38918.4668 | 0.0000 |
| Ar | 296.3838 | No Detectable | Ar | 291.3838 | No Detectable |
| Ca | 2380.9719 | 10.2089 | Ca | 2381.9819 | 10.2099 |
| Cr | 299.6779 | 0.5501 | Cr | 298.7779 | 0.5651 |
| Cr | 290.4862 | 0.5333 | Cr | 290.4862 | 0.5333 |
| Fe | 182245.4531 | 250.68 | Fe | 182748.4531 | 251.59 |
| Zn | 14921.7148 | 23.1307 | Zn | 14821.7148 | 23.1307 |
| Y | 1635.9828 | 5.0000 | Y | 1835.9828 | 6.0000 |
| Rh | 1658.8171 | No Detectable | Rh | 1758.1258 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXX. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 30%, 30min**

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO | ÁREA | | ELEMENTO | ÁREA | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 397.7366 | 0.0000 | Si | 399.7666 | 0.0000 |
| S | 7878.3257 | No Detectable | S | 7878.3268 | No Detectable |
| Ar | 239.8315 | No Detectable | Ar | 240.8315 | No Detectable |
| Cr | 276.8685 | 0.8030 | Cr | 276.8685 | 0.8030 |
| Fe | 56312.2422 | 120.0995 | Fe | 56310.2589 | 119.99 |
| Zn | 4966.3560 | 12.2447 | Zn | 4966.3560 | 12.2447 |
| Y | 972.2223 | 5.0000 | Y | 972.2223 | 5.0000 |
| Rh | 944.6155 | No Detectable | Rh | 944.6155 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXI. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 60min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 802.7828 | 0.0000 | Si | 902.7999 | 0.0000 |
| S | 17169.7246 | 0.0000 | S | 17169.6586 | 0.0000 |
| Ar | 169.4493 | No Detectable | Ar | 169.4493 | No Detectable |
| Cr | 254.3699 | 0.3699 | Cr | 254.3699 | 0.3699 |
| Fe | 141149.5313 | 151.9094 | Fe | 141149.4313 | 149.99 |
| Zn | 9522.4053 | 11.7723 | Zn | 9587.4053 | 11.7823 |
| Y | 1938.9302 | 5.0000 | Y | 1938.9302 | 5.0000 |
| Rh | 999.5897 | No Detectable | Rh | 999.5897 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 90min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 1820.3035 | 0.0000 | Si | 1820.3035 | 0.0000 |
| S | 11108.0654 | 0.0000 | S | 11108.0654 | 0.0000 |
| Ar | 279.7265 | No Detectable | Ar | 279.7265 | No Detectable |
| Cr | 371.6596 | 0.7125 | Cr | 371.6596 | 0.7125 |
| Fe | 125301.3750 | 176.6479 | Fe | 125301.3750 | 176.6479 |
| Zn | 11303.2520 | 18.4217 | Zn | 11303.2520 | 18.4217 |
| Y | 1470.7930 | 5.0000 | Y | 1470.7930 | 5.0000 |
| Rh | 957.5160 | No Detectable | Rh | 957.5160 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 120min

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 932.7004 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 12890.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 373.4822 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.0137 | Cr | 400.4605 | 1.2139 |
| Fe | 98919.5156 | 183.92 | Fe | 98919.5156 | 184.36 |
| Zn | 8396.7129 | 18.0698 | Zn | 8396.7129 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1113.8641 | 5.0000 |
| Rh | 788.8373 | No Detectable | Rh | 788.8373 | No Detectable |
| Rh | 801.6370 | No Detectable | Rh | 801.6370 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

ANEXO 3. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS MUESTRAS DE SULFATO FÉRRICO, EMPLEANDO ÁCIDO SULFÚRICO AL 20% EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Tabla LXXIV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 0.5 horas

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 931.4589 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 12780.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 389.4822 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.01478 | Cr | 400.4605 | 1.2139 |
| Fe | 98929.5156 | 146.3698 | Fe | 98919.5156 | 145.698 |
| Zn | 8496.7129 | 17.0796 | Zn | 8396.7129 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1113.8641 | 5.0000 |
| Rh | 788.8373 | No Detectable | Rh | 788.8373 | No Detectable |
| Rh | 801.6370 | No Detectable | Rh | 801.6370 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 1 hora

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 922.7004 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 17890.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 229.4822 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.0137 | Cr | 4010.4605 | 1.2139 |
| Fe | 99919.5478 | 181.4589 | Fe | 99819.5156 | 180.45 |
| Zn | 8396.7129 | 18.0698 | Zn | 8396.7229 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1113.8941 | 5.0000 |
| Rh | 788.8373 | No Detectable | Rh | 789.8389 | No Detectable |
| Rh | 801.6370 | No Detectable | Rh | 803.6470 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXVI. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 1.5 horas**

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 831.4589 | 0.0000 | Si | 732.7004 | 0.0000 |
| S | 13780.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 379.4512 | No Detectable | Ar | 542.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.01478 | Cr | 300.9605 | 1.2139 |
| Fe | 199929.51 | 222.1200 | Fe | 198919.88 | 221.2469 |
| Zn | 8596.7329 | 17.0796 | Zn | 8397.7129 | 18.1698 |
| Y | 1115.8641 | 5.0000 | Y | 1113.8641 | 5.0000 |
| Rh | 758.8473 | No Detectable | Rh | 788.8373 | No Detectable |
| Rh | 821.7370 | No Detectable | Rh | 801.6370 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXVII. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 2 horas**

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 922.7004 | 0.0000 | Si | 952.784 | 0.0000 |
| S | 17890.0869 | 0.0000 | S | 12890.0760 | 0.0000 |
| Ar | 449.4822 | No Detectable | Ar | 473.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.0137 | Cr | 402.4705 | 1.2139 |
| Fe | 194819.78 | 298.4567 | Fe | 1989829.55 | 297.4512 |
| Zn | 8396.7129 | 18.0698 | Zn | 8396.7229 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1213.8941 | 5.0000 |
| Rh | 788.8373 | No Detectable | Rh | 789.8389 | No Detectable |
| Rh | 801.6370 | No Detectable | Rh | 811.6487 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXVIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 3 horas

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 931.4589 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 12780.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 389.4822 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.01478 | Cr | 400.4605 | 1.2139 |
| Fe | 98929.5156 | 398.4570 | Fe | 98919.5156 | 583.1204 |
| Zn | 8496.7129 | 17.0796 | Zn | 8396.7129 | 18.1698 |
| Y | 1213.8641 | 5.0000 | Y | 1113.8641 | 5.0000 |
| Rh | 789.8473 | No Detectable | Rh | 788.8373 | No Detectable |
| Rh | 801.6370 | No Detectable | Rh | 801.6370 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXIX. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 7 horas

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 922.8004 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 17990.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 230.4822 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.0137 | Cr | 401.4605 | 1.2139 |
| Fe | 19198.5478 | 584.7895 | Fe | 1899819.59 | 583.1204 |
| Zn | 8396.7129 | 18.0698 | Zn | 8396.7229 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1223.8941 | 5.0000 |
| Rh | 798.8473 | No Detectable | Rh | 789.8389 | No Detectable |
| Rh | 811.6370 | No Detectable | Rh | 803.6470 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXX. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 12 horas**

| Corrida 1 | | | Corrida 2 | | |
|----------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| REPORTE DE CONCENTRACIONES | | | REPORTE DE CONCENTRACIONES | | |
| Estándar Interno = Y | | | Estándar Interno = Y | | |
| Factor de Dilución = 1 | | | Factor de Dilución = 1 | | |
| ELEMENTO ÁREA | | | ELEMENTO ÁREA | | |
| | CONCENTRACIÓN (mg/l) | | | CONCENTRACIÓN (mg/l) | |
| Si | 923.8014 | 0.0000 | Si | 932.7004 | 0.0000 |
| S | 17991.0869 | 0.0000 | S | 12890.0869 | 0.0000 |
| Ar | 231.4921 | No Detectable | Ar | 373.4822 | No Detectable |
| Cr | 400.4605 | 1.0137 | Cr | 401.4605 | 1.2139 |
| Fe | 19198.5678 | 839.4589 | Fe | 1997819.69 | 838.4589 |
| Zn | 8397.7129 | 18.0698 | Zn | 8396.7229 | 18.1698 |
| Y | 1113.8641 | 5.0000 | Y | 1223.8941 | 5.0000 |
| Rh | 789.8993 | No Detectable | Rh | 789.8389 | No Detectable |
| Rh | 814.7380 | No Detectable | Rh | 803.6470 | No Detectable |

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia