



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

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE
ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO),
PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA
REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A.**

María José Navarro y Navarro

Asesorado por la Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A.

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARÍA JOSÉ NAVARRO Y NAVARRO

ASESORADO POR LA INGA. LORENA VICTORIA PINEDA CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera Lopéz

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 4 de septiembre de 2013.



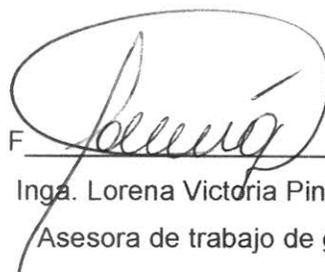
María José Navarro y Navarro

Guatemala, 4 de Septiembre del 2015

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por medio de la presente me permito presentar a la escuela de ingeniería química, la propuesta de informe final titulado **“EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SOLIDO-LIQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A.”** de la estudiante **María José Navarro y Navarro** quien se identifica con número de carné **2008-15274**, con la finalidad de obtener la correspondiente aprobación.

Asimismo, hago de su conocimiento que la propuesta cuenta con las correspondientes revisiones y aprobación de mi persona.

F 

Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Asesora de trabajo de graduación

lorvicpinedac@yahoo.com

col. 1137





Guatemala, 1 de septiembre de 2015.
Ref.EPS.DOC.567.09.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Ing. Rodríguez Serrano:

Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **María José Navarro y Navarro** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200815274**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A.”**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Asesora-Supervisora de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
LVPC/ra



Guatemala, 1 de septiembre de 2015.
Ref.EPS.D.431.09.15.

Ing. Victor Manuel Monzón Valdéz
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Monzón Valdéz.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S. A. "** que fue desarrollado por la estudiante universitaria María José Navarro y Navarro, quien fue debidamente asesorada y supervisada por la Ingeniera Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora-Supervisora de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silván José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS

SJRS/ra





Guatemala, 16 de octubre de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.071.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **002-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **María José Navarro y Navarro**.
Identificada con número de carné: **2008-15274**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

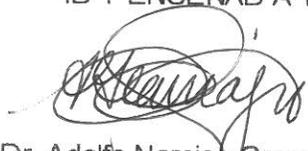
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S.A.

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Lorena Victoria Pineda Cabrera**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.157.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la estudiante **MARÍA JOSÉ NAVARRO Y NAVARRO** titulado: **"EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S.A."** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN Y LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN MINERAL QUE CONTIENE SULFURO DE PLOMO Y SULFURO DE ZINC, POR MEDIO DEL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN (SÓLIDO-LÍQUIDO), PARA OBTENER CLORURO DE PLOMO Y CLORURO DE ZINC, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS S.A.**, presentado por la estudiante universitaria: **María José Navarro y Navarro**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su amor y las bendiciones que sigue derramando en mi vida, por regalarme sabiduría e inteligencia para lograr uno de mis sueños.
- Mi padre** Aníbal Leonel Navarro Miranda, por ser un pilar importante en mi vida.
- Mi madre** Ofelia Verenize Navarro Miranda (q. e. p. d.), por tu sonrisa, amor y sacrificio.
- Mis abuelos** Luis Angel Navarro (q. e. p. d.) y Ofelia Domitila Miranda (q. e. p. d.), por ser mis segundos padres gracias por su amor, paciencia, esfuerzo y sacrificio soy lo que soy hoy, y que me siguen inspirado aún después de su muerte.
- Mis hermanos** Mario Leonel (q. e. p. d.) y Vivian Verenize Navarro y Navarro, por estar en los buenos y malos momentos en mi vida y por llenar de amor y consejos mi juventud.
- Mis tías** Odeleta Rosicler, María Isabel y Adilia Navarro Miranda, por su apoyo incondicional, sus consejos, su amor, sus oraciones.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por cuidarme y guiarme en el proceso de la carrera.
Facultad de Ingeniería	Por ser la casa de estudio y brindarme las herramientas para lograr mi objetivo como profesional.
Mis abuelos	Por su sacrificio y dedicación se aseguraron de que nunca me faltará nada.
Mis hermanos	Mario Leonel (q. e. p. d.) y Vivian Verenize Navarro y Navarro, por estar en los buenos y malos momento en mi vida y por llenar de amor y consejos mi juventud.
Mis tías	Odeleta Rosicler, María Isabel y Adilia Navarro Miranda, por su apoyo incondicional, sus consejos, su amor, sus oraciones.
Tíos	Hugo, Noel y Rafael Navarro Miranda y Edwin Otoniel Fuentes, por brindarme sus consejos y cariño en todo momento.
Familia Navarro Gonzáles	Blanca, Jessi, Mishel, Jennifer y Andrea, por apoyarme y brindarme su amor y alegría.

Primas y primos

Alejandra y Emanuel Fuentes, Nancy Bran, Edgar y Angel de León, por ser un pilar importante en mi vida.

Amigos

Isabel Cienfuegos, Laura Zetina, Nesly Hidalgo, Alejandra Sanchez, Walter Mejía, Fernando del Valle, Hector Chiroy y Lenyn Girón, porque hicieron de esta experiencia momentos agradables.

Ing. Carlos Gramajo

Por su asesoría, colaboración y apoyo en la realización de este proyecto.

**Representaciones
Químicas**

Por brindarme los recursos, el tiempo y su apoyo para realizar el proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
Hipótesis	XXII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Descripción de los minerales.....	3
2.1.1. Galena	3
2.1.2. Blenda (esfarelita).....	4
2.2. Fundamentos termodinámicos	5
2.2.1. Reacción química	5
2.2.2. Clases de reacciones químicas	5
2.3. Cinética de reacciones	6
2.3.1. Velocidad de reacción	7
2.3.2. El orden de reacción.....	9
2.3.3. Leyes de velocidad elementales y molecularidad...	11
2.3.4. Reacciones reversibles.....	12
2.4. Recolección y análisis de datos de velocidad.....	12
2.4.1. Método diferencial de análisis.....	13
2.4.2. Método integral	14

2.5.	Reacciones múltiples	14
2.5.1.	Tipos de reacciones	14
2.5.2.	Velocidades netas de reacción.....	15
2.5.2.1.	Expresión de la velocidad neta de formación para cada especie	16
2.5.2.2.	Ley de velocidad	17
2.6.	Lixiviación por agitación	17
2.6.1.	Granulometría	19
2.6.2.	Tiempo de lixiviación	19
2.6.3.	Mineralogía del mineral	20
2.7.	Sistemas complejos	21
2.7.1.	EDTA.....	21
2.7.2.	Enmascaramiento	22
2.7.3.	Indicadores metalocrómicos.....	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variable independiente.....	25
3.1.2.	Variable dependiente	25
3.1.3.	Factores constantes	26
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles	27
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27
3.4.1.	Materia prima e insumos	27
3.4.2.	Cristalería, reactivos y equipo	27
3.5.	Técnica cuantitativa.....	29
3.5.1.	Desarrollo del método de lixiviación por agitación (sólido-liquido) para determinar la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc.....	29

3.5.2.	Digestión del mineral con ácido sulfúrico y ácido clorhídrico	32
3.5.3.	Método de análisis para determinar la concentración de zinc, plomo y los demás elementos en el mineral y el extracto	32
3.5.4.	Método de lixiviación por agitación del mineral con cloruro férrico	35
3.5.5.	Determinación de la cinética de reacción y el orden de reacción utilizando el método diferencial de análisis de velocidad	35
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	36
3.6.1.	Datos originales para determinar la concentración de plomo y zinc que contiene el mineral (galena y blenda) digerida con HCl y H ₂ SO ₄	36
3.6.2.	Datos originales para determinar el efecto de la temperatura en función de la concentración de la eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral ..	40
3.6.3.	Datos originales para determinar la velocidad de reacción y el orden de reacción	47
3.6.4.	Datos originales para determinar el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales.....	49
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	50
3.7.1.	Concentración de los elementos que contiene el mineral digerida con HCl y H ₂ SO ₄	50

3.7.2.	Concentración de la eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral.....	54
3.7.3.	Concentración de sulfuro de zinc, sulfuro de plomo y cloruro férrico para determinar la velocidad de reacción química	60
3.7.4.	Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales	61
3.7.5.	Análisis estadístico para la comprobación de la hipótesis	62
3.8.	Análisis estadístico.....	64
3.8.1.	Número de repeticiones	64
3.8.2.	Variables de respuestas	65
3.8.3.	Varianza y desviación estándar.....	65
3.8.4.	Prueba de hipótesis para la comparación de medias.....	66
3.8.4.1.	Prueba de F de Snedecor-Fisher	66
3.8.4.2.	Prueba <i>t</i> de Student	66
3.8.5.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	68
4.	RESULTADOS.....	71
4.1.	Concentración de zinc y plomo en forma de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo contenidos en el mineral	71
4.2.	Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo a cloruro de zinc y cloruro de plomo	72
4.3.	La velocidad de reacción química y el orden de reacción respecto a la conversión del sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.....	74

4.4.	Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales que se forman en el extracto mediante el filtrado en caliente	75
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	77
6.	LOGROS OBTENIDOS	81
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA	87
	APÉNDICES	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Determinación experimental de la energía de activación de una reacción.....	9
2.	Equipos de lixiviación por agitación 1	18
3.	Porcentaje de extracción en función del tiempo	20
4.	Diagrama general a nivel laboratorio del proceso de producción para determinar la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc	31
5.	Eficiencia de conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas	73
6.	Eficiencia de conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas	74

TABLAS

I.	Condiciones de acidez en la cual los siguientes iones pueden ser titulados con EDTA.....	22
II.	Sustancias empleadas como agente enmascarante	23
III.	Indicadores metalocrómicos.....	24
IV.	Datos experimentales para determinar el porcentaje de los elementos de Zn, Mg, Ca y Fe+3 en el mineral digerido con ácido clorhídrico	37
V.	Datos experimentales para determinar la concentración de aluminio en el mineral digerido con ácido clorhídrico	37

VI.	Datos experimentales para determinar la concentración de hierro ferroso en el mineral digerido con ácido clorhídrico	38
VII.	Datos experimentales para determinar la concentración de Zn, Mg, Ca y Fe+3 en el mineral digerido con ácido sulfúrico.....	38
VIII.	Datos experimentales para determinar la concentración de aluminio en el mineral digerido con ácido sulfúrico	39
IX.	Datos experimentales para determinar la concentración de hierro ferroso en el mineral digerido con ácido sulfúrico	39
X.	Datos experimentales para determinar la concentración de plomo total y como carbonato en el mineral.....	40
XI.	Insumos del mineral y cloruro férrico agregado en las lixiviaciones	40
XII.	Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 90 °C	41
XIII.	Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 90 °C	41
XIV.	Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 100 °C	42
XV.	Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 100 °C	42
XVI.	Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 106 °C	43
XVII.	Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 106 °C	43
XVIII.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 90 °C.....	44
XIX.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 90°C	44
XX.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 100 °C	45

XXI.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 100 °C.....	45
XXII.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 106 °C	46
XXIII.	Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 106 °C.....	46
XXIV.	Datos experimentales para determinar los gramos de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto.....	47
XXV.	Datos experimentales para determinar la concentración de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto.....	47
XXVI.	Datos experimentales para determinar la constante de velocidad química y el orden de reacción.....	48
XXVII.	Ecuaciones no lineales para determinar la constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath	48
XXVIII.	Despeje de ecuación no lineal para determinar la constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath	49
XXIX.	Datos experimentales para determinar los gramos de cristales de cloruro de plomo.....	49
XXX.	Condiciones de temperatura para determinar el porcentaje de cristales de cloruro de plomo.....	50
XXXI.	Concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido clorhídrico	51
XXXII.	Análisis estadístico de la concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido clorhídrico	52
XXXIII.	Concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido sulfúrico	52
XXXIV.	Análisis estadístico de la concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido sulfúrico	53
XXXV.	Concentración de plomo en el mineral	54

XXXVI.	Análisis estadístico de la concentración de plomo en el mineral.....	54
XXXVII.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 90 °C	55
XXXVIII.	Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 90 °C	55
XXXIX.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 100 °C	56
XL.	Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 100 °C	56
XLI.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 106 °C	57
XLII.	Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 106 °C	57
XLIII.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 90 °C	58
XLIV.	Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 90 °C	58
XLV.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 100 °C	58
XLVI.	Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 100 °C	59
XLVII.	Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 106 °C	59
XLVIII.	Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 106 °C	59
XLIX.	Velocidad de reacción en función de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto	60
L.	Constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath...	60

LI.	Gramos de cloruro de plomo en cristales recuperados a una temperatura de 106 °C	61
LII.	Análisis de estadístico del porcentaje de cristales de cloruro de plomo a una temperatura de 106 °C.....	61
LIII.	Prueba de Fisher para varianza de dos muestras para la concentración de conversión sulfuro de zinc a cloruro de zinc al cambiar de temperatura.....	62
LIV.	Prueba de Fisher para varianza de dos muestras para la concentración de conversión sulfuro de plomo a cloruro de plomo al cambiar de temperatura.....	62
LV.	Prueba de <i>t</i> -Student para muestras suponiendo varianzas desiguales para la concentración de conversión sulfuro de zinc al cambiar de temperatura.....	63
LVI.	Prueba de <i>t</i> -Student para muestras suponiendo varianzas desiguales para la concentración de conversión de sulfuro de plomo al cambiar de temperatura	63
LVII.	Dados dos conjuntos de datos	67
LVIII.	Concentración de los elementos que contiene el mineral digerida con ácido clorhídrico.....	71
LIX.	Concentración de los elementos que están como carbonato en el mineral digerida con ácido sulfúrico	71
LX.	Concentración de los elementos entre ambas digestiones que contiene el mineral.....	72
LXI.	Eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas	73
LXII.	Constante de velocidad de reacción de la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico en un mineral.....	74
LXIII.	Orden de reacción de la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico en un mineral	75

LXIV. Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en cristales.....75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C°	Celsius de temperatura
cm	Centímetro
k_A	Constante de velocidad de reacción
S	Desviación estándar
E_a	Energía de activación
E	Error
g	Gramos
L	Litros
mg	Miligramos
ml	Mililitros
n	Número de corrida
m	Peso de la muestra
p	Probabilidad de éxito
q	Probabilidad de fracaso
h	Unidad de tiempo, hora
min	Unidad de tiempo, minuto
z	Valor estadístico de la curva
S²	Varianza
r_i	Velocidad de reacción

GLOSARIO

Cinética	Rama de la dinámica que estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo originan.
Cinética química	Estudio de la velocidad de las reacciones químicas.
Coeficiente estequiométrico	Es un número que funciona en cierta forma como un multiplicador indicando el número de moléculas de un determinado tipo que participa en una ecuación química dada.
Filtración	Es un proceso unitario de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido.
Heterogéneo	Es un sistema que está formado por dos o más fases.
Hidrometalurgia	Es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas.

Homogéneo	Es aquel sistema material que está formado por una sola fase.
Lixiviación	La lixiviación es un proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido.
Mineralogía	Es la rama de la geología que estudia las propiedades físicas y químicas de los minerales que se encuentran en el planeta en sus diferentes estados de agregación.
Molecularidad	Indica el número de partículas individuales que participan en un paso elemental del mecanismo de reacción.
Orden de reacción	Es la suma de los exponentes de las concentraciones en la ley de la rapidez de la reacción.
Presión atmosférica	Es la fuerza que ejerce el aire atmosférico sobre la superficie terrestre.
Reacción irreversible	Avanza en una sola dirección hasta que la reacción sea completa, es decir hasta que se agote uno o todos los reactantes.

Reacción reversible	Es una reacción química en la cual los productos de la reacción vuelven a combinarse para generar los reactivos.
Solubilidad	Es una medida de la capacidad de disolverse de una determinada sustancia en un determinado solvente.
Termodinámica	Es la rama de la física que describe los estados de equilibrio a nivel macroscópico.
Velocidad de reacción	Se define como la cantidad de sustancia que se transforma en una determinada reacción por unidad de volumen y tiempo.

RESUMEN

En el presente estudio se obtuvo cloruro de zinc y cloruro de plomo a partir de un mineral que contiene 26,40 % de sulfuro de zinc (esfalerita) y 3,95 % de sulfuro de plomo (galena), aplicando el método de lixiviación por agitación con cloruro férrico en solución a nivel laboratorio.

Se determinó la concentración de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo que contiene el mineral, para esto se realizaron dos digestiones, una utilizando ácido clorhídrico para obtener el dato de plomo y zinc total y la otra utilizando ácido sulfúrico para obtener el zinc y plomo como carbonato, la diferencia de ambos resultados es la concentración de zinc y plomo como sulfuro, se utilizaron métodos de análisis químicos volumétricos.

Se determinó el efecto de la temperatura aplicando el método de lixiviación por agitación sólido-líquido, utilizando temperaturas de 90,100 y 106 °C en un tiempo de 300 minutos de reacción. Asimismo, se determinó el porcentaje de eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo utilizando cloruro férrico en solución al 37,54 %. El mayor porcentaje de eficiencia de reacción es de 92,87 % para el sulfuro de zinc y 99,76 % para el sulfuro de plomo a temperatura de reacción de 106 °C.

Se determinó la cinética química de la reacción por lixiviación con agitación de sulfuro de plomo (galena) y sulfuro de zinc (esfalerita) a partir de un mineral utilizando cloruro férrico, como una reacción múltiple en paralelo, donde se aplica un modelo matemático utilizando los datos experimentales a temperatura de reacción de 106 °C, por medio del programa Polymath se aplica

el método de Newton de ecuaciones no lineal para calcular las constantes de velocidad de reacción y el orden de reacción. Para obtener datos a diferentes tiempos, se realizaron reacciones y se detuvieron a tiempos de 15, 30, 60, 120, 180, 240 y 300 minutos. Para detener la reacción a los tiempos definidos, se agregó la solución en un sistema de enfriamiento brusco, tal que la temperatura disminuyó de 106 a 50 °C en un tiempo de 2 minutos y continuó descendiendo.

Se determinó el porcentaje de cristales de cloruro de plomo recuperados mediante filtrado en caliente, esto se realizó mediante una corrida experimental con un tiempo de 300 minutos a temperatura de reacción de 106 °C. Para poder filtrar en caliente, al concluir el tiempo de reacción se procedió a agregar floculante para separar la solución de los insolubles y el líquido sobrenadante se filtró a temperatura de 80 °C.

OBJETIVOS

General

Determinar la concentración de sulfuro de zinc y plomo en un mineral y evaluar la cinética de reacción como una reacción múltiple en paralelo, empleando el método de lixiviación por agitación con cloruro férrico como reactante, a nivel laboratorio para la empresa Representaciones Químicas, S. A.

Específicos

1. Determinar la concentración de zinc y plomo en forma de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo contenidos en el mineral.
2. Determinar el efecto de la temperatura sobre la eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo a cloruro de zinc y cloruro de plomo.
3. Determinar la velocidad de reacción química y el orden de reacción respecto a la conversión del sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.

Determinar el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales, que se forma en el extracto mediante el filtrado en caliente y posterior enfriamiento a temperatura ambiente.

Hipótesis

Hipótesis científica

1. Al aumentar la temperatura de reacción entre un mineral que contiene sulfuro de zinc y sulfuro de plomo y cloruro férrico en solución, aumenta el porcentaje de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo a cloruro de zinc y cloruro de plomo.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula

1. No existe variación en el porcentaje de conversión de sulfuro de zinc a cloruro de zinc al aumentar la temperatura de reacción.
2. No existe variación en el porcentaje de conversión de sulfuro de plomo a cloruro de plomo al aumentar la temperatura de reacción.

$$\% \varepsilon_{T_1} = \% \varepsilon_{T_2} = \% \varepsilon_{T_3}$$

Donde

$\% \varepsilon_{T_1}$ = porcentaje de conversión a temperatura 1

$\% \varepsilon_{T_2}$ = porcentaje de conversión a temperatura 2

$\% \varepsilon_{T_3}$ = porcentaje de conversión a temperatura 3

Hipótesis alterna

1. Existe variación en el porcentaje de conversión de sulfuro de zinc a cloruro de zinc al cambiar de temperatura.
2. Existe variación en el porcentaje de conversión de sulfuro de plomo a cloruro de plomo al cambiar de temperatura.

$$\% \varepsilon_{T_1} \neq \% \varepsilon_{T_2} \neq \% \varepsilon_{T_3}$$

Donde

$\% \varepsilon_{T_1}$ = porcentaje de conversión a temperatura 1

$\% \varepsilon_{T_2}$ = porcentaje de conversión a temperatura 2

$\% \varepsilon_{T_3}$ = porcentaje de conversión a temperatura 3

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país inminentemente con vocación minera, su situación geográfica hace que tenga muchos minerales para la explotación industrial, desde los minerales metálicos (oro, plata, zinc, cobre, plomo) como los no metálicos (mica, calizas, serpentinitas, jade), la lixiviación de los minerales metálicos y no metálicos se utilizan como materia prima en la fabricación de productos de consumo cotidiano para uso industrias y agroindustrial. Una aplicación de cloruro de zinc es en la industria de la batería como materia prima, en la industria textil, materia prima de la aleación de aluminio, medicina y tratamiento de aguas residuales en la industria y cloruro de plomo se utiliza para fontanería, la pintura y los pigmentos En la actualidad ha despertado el interés a nivel mundial respecto a diferentes propiedades de los minerales asociados como: la malaquita, galena, blenda, pirita, entre otras.

Se tiene como finalidad determinar la concentración de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo en el mineral y la cinética química. El mineral pasa por un proceso de trituración y molienda pasándolo a malla 80, se toma una muestra para realizar las digestiones con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, utilizando métodos volumétricos para determinar el porcentaje de zinc y plomo. Durante la obtención de cloruro de plomo y cloruro de zinc se realizaron variaciones en la temperatura para obtener el porcentaje de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en solución al 37,54 %.

En la cinética química de sulfuro de plomo (galena) y sulfuro de zinc (esfalerita) con cloruro férrico, se utilizó una reacción múltiple en paralelo donde se aplicó un modelo matemático y los datos experimentales a una temperatura

de 106 °C, por medio del programa Polymath se aplica el método de Newton de ecuaciones no lineal para calcular la constante de velocidad de reacción y el orden de reacción.

1. ANTECEDENTES

En varios países se ha desarrollado investigaciones sobre el cloruro de plomo, cloruro de zinc y los minerales que existen en la naturaleza teniendo variedades en todo el mundo, se ha identificado aproximadamente 10 especies de minerales que contienen altos contenidos de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo

- En agosto de 1993, fue publicado en la unidad Iztapalapa un informe final realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana, titulado *Modelación matemática de la cinética de lixiviación de plomo a partir de un concentrado de galena con cloruro férrico*, teniendo como investigadora a Maribel Cano Hernández para la obtención del grado de maestro en Ingeniería Química.

En este proyecto se evaluó un modelo matemático de la cinética de lixiviación de plomo, a partir de un concentrado de galena, con cloruro férrico. El modelo se basa en el concepto de núcleo decreciente, en el estado transitorio para una partícula de mineral considerando la formación, difusión y equilibrio de cloroComplejo de hierro y plomo. Incluye la restricción de la solubilidad del cloruro de plomo. La validez del planteamiento teórico se comprueba con datos experimentales, que abarca rangos amplios de temperatura, concentración de cloruro férrico, ácido clorhídrico, cloruro de sodio y porcentaje de sólidos. Se obtiene una corroboración satisfactoria del modelo a las diferentes condiciones del sistema, el cual preside la formación de $PbCl_2$, en la frontera de reacción, siendo este el factor limitante en la extracción del plomo.

- En mayo de 1997, fue publicado en la Unidad Iztapalapa un informe final realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, titulado *Lixiviación galena con cloruro férrico para la obtención de plomo*, teniendo como investigadoras a Gabriela Aguilar, Miranda González y Alicia Morales para la obtención de Ingeniero Químico en Desarrollo y Diseño de Procesos.

En este proyecto se pretende resaltar las ventajas de la lixiviación selectiva del concentrado de galena sobre el procedimiento actual para la obtención de plomo a partir de la misma. Los beneficios de la lixiviación de este proceso no generan dióxido de azufre ni de plomo a la atmósfera. Una de las ventajas es la rapidez con la que puede ser llevado a cabo la extracción de un 99 % de Pb del concentrado de galena en tan solo unos minutos. El proceso presenta la opción de la recuperación, mediante cementación o intercambio iónico, de subproductos provenientes de la solución lixivante, tales como la plata y el cobre. El cloruro de plomo producido es lo suficientemente puro para ser sometido a una electrolisis y obtener de tal modo el plomo en forma de metal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción de los minerales

A continuación se muestra la descripción de los minerales.

2.1.1. Galena

La galena es un sulfuro de plomo (PbS) es de color gris plomizo se trata por tanto de un mineral blando, frágil, muy pesado, opaco, de color gris claro o plomizo y raya negra, presentando redon fracturado, un brillo metálico intenso difícil de olvidar.

Constituye el mineral principal para la extracción de plomo, aunque la plata también es habitualmente un subproducto del mineral, especialmente en la galena argentífera. El plomo es uno de los metales más conocidos en la antigüedad, se usaba ya por los romanos y hasta recientemente para las conducciones de aguas en la construcción de los elementos ornamentales de la fuentes y para las techadas de las grandes catedrales.

Se presenta generalmente en filones metalíferos, aunque también se puede presentar en ambientes sedimentario rocas sedimentarias impregnadas de galena y metamórficos. Otros minerales para la obtención del plomo son la *cerusita* (carbonato de plomo) o la piromorfita (clorofosfato de plomo) aunque prácticamente toda la producción de plomo se obtiene de la galena.

Un problema mayor con el plomo en alguno de sus usos es su toxicidad, ya que la acumulación, aunque sea de minúsculas cantidades, en el sistema del cuerpo puede causar daño cerebral permanente y/o problemas en el sistema nervioso central, hígado y riñones, y aun la muerte.¹ Los problemas de toxicidad están presentes tanto en su producción como en el uso y las emisiones de las fundidoras y refinerías deben ser cuidadosamente reguladas. Las gasolinas con plomo *hand* prácticamente eliminadas de todos los países. Aun cuando hay mucha información acerca de los efectos de la sobrexposición al plomo, no existe acuerdo sobre cuál es el nivel máximo permisible.

2.1.2. Blenda (esfarelita)

La blenda o esfarelita es un sulfuro de zinc que en forma cristalizada se presenta en cristales tetraédricos o docecaedricos. La blenda acaramelada suele ser de color amarillo a pardo rojizo si es pura, volviéndose oscura a medida que aumenta el contenido en hierro, denominándose entonces blenda ferrífera (o marmamita), variedad a la que pertenecen las muestras de la colección.

Otros minerales conocidos que contiene zinc aunque en menor proporción son: la cincita (óxido de zinc), la mithsonita (carbonato de zinc) y la calamina o herminorfita (silicato de zinc).

La blenda constituye el principal mineral para la obtención del metal maleable llamado zinc, uno de los componentes del latón (aleación de zinc + cobre) y de otras aleaciones muy importantes en varias industrias, así como el galvanizado de hierro a fin de protegerlo de la oxidación superficial. El zinc que impide toda corrosión ulterior, utilizando según esta propiedad para la

¹Gobierno de Guatemala Ministerio de Energía y Minas.

fabricación de canalones y techados. También se emplea en las pilas eléctricas como ánodo.

Su nombre derivado del alemán *blender*, ofuscar, por su aspecto que se puede confundir para el profano con el de la galena si presenta un porcentaje de hierro elevado. El nombre de esfalerita proviene del griego *spaleros*, engañoso.

2.2. Fundamentos termodinámicos

A continuación se muestran los fundamentos termodinámicos.

2.2.1. Reacción química

Una reacción química, cambio químico o fenómeno químico, es todo proceso termodinámico en el cual una o más sustancias, por efecto de un factor energético, se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias llamadas productos. Esas sustancias pueden ser elementos o compuestos.

2.2.2. Clases de reacciones químicas

Según el tipo de transformación que tenga lugar, se consideran los siguientes tipos de reacción

Combinación o síntesis

Ocurre cuando se unen dos o más sustancias para formar otra sustancia, cuyas moléculas son el resultado de una reagrupación de átomos de los reactivos.



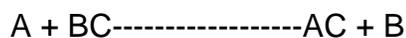
Descomposición

Ocurre cuando a partir de un compuesto se producen dos o más sustancias.



Desplazamiento o sustitución

En estas reacciones, un elemento sustituye y libera a otro elemento presente en el compuesto.



Intercambio o doble sustitución

Al reaccionar dos compuestos intercambian elementos y se producen dos nuevos compuestos.



Es difícil encontrar reacciones inorgánicas comunes que puedan clasificarse correctamente como de doble sustitución.

2.3. Cinética de reacciones

El hecho de que una reacción sea termodinámicamente posible ($\Delta G < 0$), no es suficiente para predecir si la reacción va a pasar en una escala de tiempo razonable. Eso depende de la cinética de la reacción. Este factor es muy importante para la concepción y la evaluación de la rentabilidad económica de los procesos. También en las plantas en operación, optimizar la cinética resulta generalmente en un mejoramiento del proceso.

De esta forma, los productos finales de una operación van a estar condicionados generalmente por condiciones de tipo cinético.

En una reacción homogénea solo interviene una fase. En una reacción heterogénea interviene más de una fase, y la reacción se efectúa en la interfaz entre las fases o muy cerca de ella. Una reacción irreversible avanza en una sola dirección y continúa en esa dirección hasta que se agotan los reactivos. Una reacción reversible en cambio puede avanzar en cualquiera de las dos direcciones dependiendo de las concentraciones de los reactivos y productos, en relación con las concentraciones de equilibrio correspondientes. Una reacción irreversible se comporta como si no existiera una condición de equilibrio. En términos estrictos, ninguna reacción química es totalmente irreversible, pero en muchas reacciones el punto de equilibrio está tan lejos a la derecha que se tratan como reacciones irreversibles.

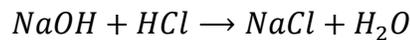
2.3.1. Velocidad de reacción

En las reacciones químicas que se consideran en los siguientes párrafos, se toma como base de cálculo la especie A, que es uno de los reactivos limitantes como base de cálculo. La velocidad de desaparición de A, $-r_A$ depende de la temperatura y la composición, y en el caso de muchas reacciones se puede escribir como el producto de una constante de velocidad de reacción K y una función de las concentraciones de las diversas especies que participan en la reacción:

$$-r_A = [k_A(T)][f(C_A, C_B, \dots)] \text{ Ec. 1 y Ref. 4}$$

La ecuación algebraica que relaciona $-r_A$ con las concentraciones de las especies se denomina expresión cinética o ley de velocidad. La velocidad de reacción específica, K_A , al igual que la velocidad de reacción, $-r_A$, siempre se

toma con referencia a una especie dada de las reacciones y normalmente debe llevar el subíndice correspondiente a esa especie. Sin embargo, en el caso de reacciones en las que el coeficiente estequiométrico es 1 para todas las especies que intervienen en la reacción por ejemplo.



Se omitirá el subíndice de la velocidad de reacción específica:

$$k = k_{NaOH} = k_{HCl} = k_{NaCl} = k_{H_2O}$$

La velocidad de cualquier reacción es proporcional a la concentración del reactante, elevado al orden de la reacción. Esta expresión puede ser integrada para mostrar la evolución de la concentración con el tiempo para una cierta constante de velocidad y un cierto orden de reacción. La mayoría de las reacciones son de primer orden. Si la reacción es de primer orden ($n = 1$), entonces se llega a:

$$C_t = C_0 e^{-kte}$$
$$\log \frac{C}{C_0} = -\frac{kt}{2.303}$$

La constante de velocidad (k) de cualquier reacción puede ser expresada por la ecuación de ARRHENIUS:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad \text{Ec. 2 y Ref. 4}$$

E_a = energía de activación de la reacción

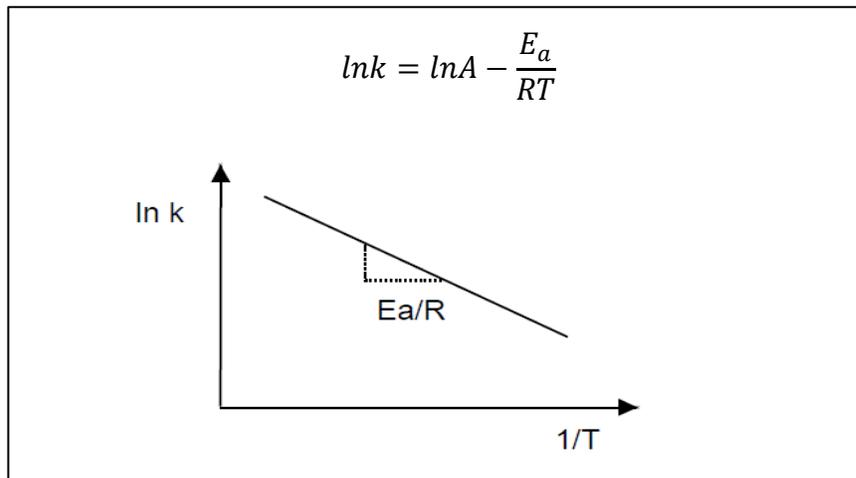
R = constante de los gases (8,314 J/molK)

T = temperatura absoluta (K)

A = constante relacionada con la frecuencia de colisiones de la especie en solución.

Experimentalmente, el valor de E_a de una reacción puede ser determinado en un diagrama $\ln k$ versus $1/T$, calculando la pendiente de la recta (E_a/R).

Figura 1. **Determinación experimental de la energía de activación de una reacción**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

2.3.2. El orden de reacción

La dependencia de la velocidad de reacción $-r_A$ respecto a las concentraciones de las especies presentes, $F_n(C_i)$ se determina en prácticamente todos los casos por observación experimental. Aunque la dependencia funcional podría postularse a partir de la teoría, se requieren experimentos para confirmar la forma propuesta. Una de las formas generales más comunes de esta dependencia es el producto de las concentraciones de

las especies individuales que reaccionan, cada una de las cuales se eleva a una potencia; por ejemplo.

$$-r_A = k_A C_A^\alpha C_B^\beta \quad \text{Ec. 3 y Ref. 4}$$

Los exponentes de las concentraciones de la ecuación dan pie al concepto de orden de reacción. El orden de una reacción se refiere a las potencias a las que las concentraciones se elevan en la ley de velocidad cinética. En la ecuación la reacción es de orden α respecto al reactivo A y de orden β respecto al reactivo B el orden global de la reacción (n) es:

$$n = \alpha + \beta$$

Las unidades de la velocidad de reacción específica, k_A , varían con el orden de la reacción. Considerando una reacción en la que solo interviene un reactivo como.



Para este tipo de reacción, las leyes de velocidad que corresponden a una reacción de orden cero, primero, segundo y tercer ordenes, junto con las unidades típicas para las constantes de velocidad correspondientes, son:

$$\text{Orden cero: } -r_A = k_A; \left(\frac{\text{mol}}{\text{dm}^3 \cdot \text{s}} \right)$$

$$\text{Primer orden: } -r_A = k_A C_A; (\text{S}^{-1})$$

$$\text{Segundo Orden: } -r_A = k_A C_A^2; \left(\frac{\text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{s}} \right)$$

$$\text{Tercer Orden: } -r_A = k_A C_A^3; \left(\text{dm}^3/\text{mol} \right)^2 * \text{s}^{-1}$$

La energía de activación, el factor de frecuencia y los órdenes de reacción de un gran número de reacciones en fase gaseosa y líquida, se pueden encontrar en las circulares y suplementos del National Bureau of Standards.

2.3.3. Leyes de velocidad elementales y molecularidad

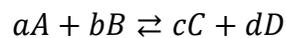
Una reacción tiene una ley de velocidad elemental si el orden de reacción de cada especie es idéntico al coeficiente estequiométrico de esa especie en la reacción tal como está escrita.

En algunos círculos, cuando una reacción tiene una ley de velocidad elemental se dice que es una reacción elemental. A veces se da una definición más restrictiva de reacción elemental, en la que interviene el mecanismo o camino molecular de la reacción.

En el estudio de los órdenes de reacción y mecanismos cinéticos, a veces se habla de la molecularidad de una reacción. La molecularidad es el número de átomos, iones o moléculas que intervienen (chocan) en el paso de la reacción que limita la velocidad. Los términos unimolecular, bimolecular y termolecular se refieren a reacciones en las que intervienen respectivamente uno, dos o tres átomos (o moléculas) que interactúan o chocan en un paso dado de la reacción.

2.3.4. Reacciones reversibles

Todas las leyes de velocidad para reacciones reversibles deben reducirse a la relación termodinámica que relaciona las concentraciones de las especies en el equilibrio. En el equilibrio, la velocidad de reacción es idénticamente cero para todas las especies (es decir, $-r_A=0$). Es decir, para la reacción general.



Las concentraciones en el equilibrio están relacionadas por las relaciones termodinámicas.

$$K_C = \frac{C_{Cc}^c * C_{Dc}^d}{C_{Ac}^a * C_{Bc}^b}$$

Las unidades de K_C son $(\text{mol}/\text{dm}^3)^{d+c-b-a}$.

2.4. Recolección y análisis de datos de velocidad

Se presentan dos técnicas para obtención de datos: medidas de concentración contra tiempo de un reactor intermitentes y medidas de concentración en reactor diferencial. Los métodos diferenciales e integrales, el método de las vidas medias, el método de las velocidades iniciales y la regresión lineal y no lineal. Los métodos diferenciales e integrales se emplean principalmente para analizar datos de reactor intermitentes. Cuando la reacción es irreversible, es posible en muchos casos determinar el orden de reacción α y la constante velocidad específica por regresión no lineal o por diferenciación numérica de datos de concentración contra tiempo. Por ejemplo, si para la reacción de descomposición.

A → Producto

$$-r_A = k_A r_A^\alpha \quad \text{Ec. 4 y Ref. 4}$$

Entonces se puede usar el método diferencial.

2.4.1. Método diferencial de análisis

Se utiliza para un sistema de volumen constante y registrando la concentración en función del tiempo. Al cambiar el balance molar con la ley de velocidad dada por la ecuación 3 se obtiene.

$$\frac{-dc_A}{dt} = k_A c_A^\alpha \quad \text{Ec. 5 y Ref. 4}$$

Después tomando el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación 3.

$$\ln\left(\frac{-dc_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln c_A \quad \text{Ec. 6 y Ref. 4}$$

Observar que la pendiente de una gráfica de $\ln\left(\frac{-dc_A}{dt}\right)$ en función de $\ln c_A$ es de orden de reacción, α .

Se describen tres métodos para determinar la derivada a partir de datos que dan la concentración en función del tiempo, estos métodos son:

- Diferencia gráfica
- Fórmulas de diferencia numéricas
- Diferencias ajustando a un polinomio

2.4.2. Método integral

Para determinar el orden de reacción por el método integral, se supone el orden de reacción y se integra la ecuación diferencial empleado para modelar el sistema intermitente. Si el orden que se asume es correcto, la gráfica apropiada (determinada a partir de la integración) de los datos de concentración- tiempo deberían ser lineales. El método integral se usa con mayor frecuencia cuando el orden de reacción es conocido y se desea evaluar la constante de velocidad de reacción específica a diferentes temperaturas para determinar la energía de activación.

- Suponer el orden de reacción e integrar la ecuación de balance de moles.
- Calcular la función de concentración resultante de concentración para los datos y graficar en función del tiempo. Si la gráfica resultante es lineal es probable que el orden de reacción supuesto será el correcto.
- Si la gráfica no es lineal, suponer otro orden y repetir el procedimiento.

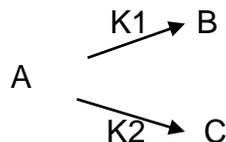
2.5. Reacciones múltiples

A continuación se muestran los tipos de reacciones de múltiples.

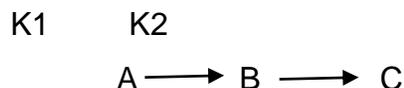
2.5.1. Tipos de reacciones

Hay cuatro tipos fundamentales de reacciones múltiples: en serie, en paralelo, compleja e independiente. Estos tipos de reacción múltiple llegan a ocurrir por si solas, en pares o todas juntas. Cuando hay una combinación de reacciones en paralelo y en serie, se denomina reacciones complejas.

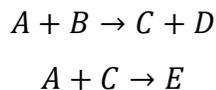
Las reacciones en paralelo son aquellas en las cuales el reactivo se consume por dos caminos de reacción distinto para formar producto diferente.



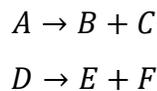
Las reacciones en serie son aquellas en las cuales el reactivo forma un producto intermedio, el cual vuelve a reaccionar para formar otros productos:



Las reacciones complejas son reacciones múltiples que incluye una combinación de reacciones en series y paralelo, como



Las reacciones independientes son aquellas que ocurren de manera simultánea, pero los productos y reactivos no reaccionan entre sí ni consigo mismo.



2.5.2. Velocidades netas de reacción

A continuación se muestran las velocidades netas de reacción.

2.5.2.1. Expresión de la velocidad neta de formación para cada especie

Se escribe los balances de masa, el punto clave para reacciones múltiples es escribir la velocidad neta de formación para cada especie. Se tiene que sumar las velocidades formación para cada reacción con la finalidad de obtener las velocidades netas de formación. Si se están efectuando q reacciones.



.

.

.



Se observa que las constantes de velocidad de reacción, k, en las reacciones 1 y 2 están definidas con respecto a A, mientras que k en la reacción 3 está definida con respecto a B. Las velocidades netas de reacción de A y B para cada reacción en la cual participan las especies A y B.

$$r_A = r_{1A} + r_{2A} + r_{3A} + \dots + r_{qA} = \sum_{i=1}^q r_{iA} \quad \text{Ec. 7 y Ref. 4}$$

$$r_B = r_{1B} + r_{2B} + r_{3B} + \dots + r_{qB} = \sum_{i=1}^q r_{iB}$$

Cuando se obtiene la sumatoria de las velocidades de reacciones individuales para una especie, se debe tener en cuenta que en aquellas reacciones en las cuales una especie no aparece, la velocidad es cero.

2.5.2.2. Ley de velocidad

La ley de velocidad para cada una de las reacciones individuales se expresan en término de las concentraciones C_j de las especies reaccionantes. Por ejemplo si la reacción $A + 2C \rightarrow 3E$ siguiera una ley de velocidad elemental, la velocidad de desaparición de A podría ser

$$-r_{2A} = k_{2A}C_A C_C^2 \quad \text{Ec. 8 y Ref. 4}$$

O, en términos de la velocidad de formación de A en la reacción.

$$r_{2A} = -k_{2A}C_A C_C^2$$

Para el conjunto general de las reacciones, la ley de velocidad para la velocidad de formación de las especies de reactivo A_j en la reacción i podría depender de la concentración de la especie A_k y la especie A_j , por ejemplo.

$$r_{ij} = -k_{ij}C_k^2 C_j^3$$

Se necesita determinar la ley de velocidad para al menos una especie en cada reacción.

2.6. Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación se utiliza en los minerales de leyes más altas cuando los minerales generan un alto contenido de finos en la etapa de chancado, o cuando el mineral deseado está tan bien diseminado que es necesario molerlo para liberar sus valores y exponerlos a la solución lixivante.

Se recurre a la agitación mediante burbujeo o bien a la agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se logra la disolución completa, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas. Los agitadores mecánicos son simplemente impulsores colocados en el interior del tanque (figura 2.4.1a), mientras que los tanques agitados con aire son a menudo tanques de tipo "Pachuca" (figura 2.4.1b).

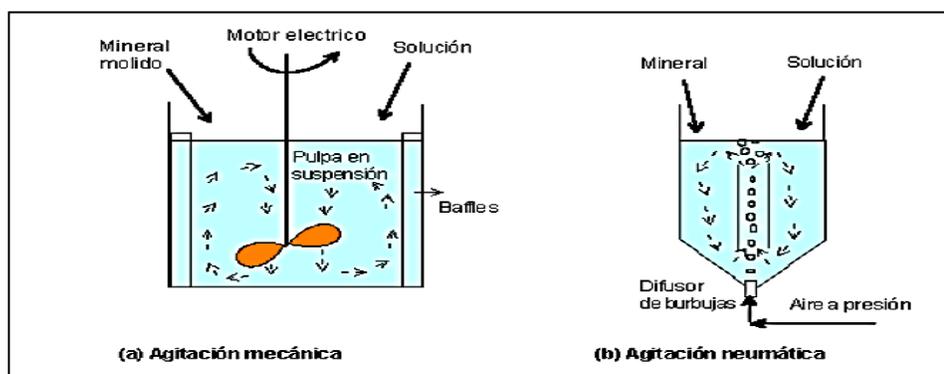
Sus ventajas comparativas con otros métodos de lixiviación son:

- Alta extracción del elemento a recuperar
- Tiempos cortos de procesamiento (horas)
- Proceso continuo que permite una gran automatización
- Facilidad para tratar menas alteradas o generadoras de finos

Sus desventajas son:

- Un mayor costo de inversión y operación.
- Necesita una etapa de molienda y una etapa de separación sólido-líquido (espesamiento y filtración).

Figura 2. Equipos de lixiviación por agitación 1



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Photoshop.

2.6.1. Granulometría

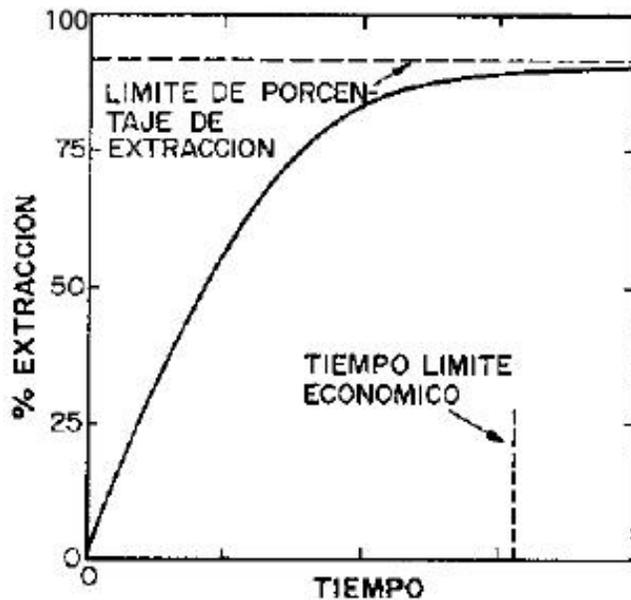
El grado de molienda debe ser lo suficiente para exponer, por lo menos parcialmente, la superficie del mineral valioso a la acción de la solución lixivante.

Depende del tipo de mineral y de sus características mineralógicas. Deberá considerarse un tamaño tal que no contenga un exceso de gruesos (> 2 mm) que produzca problemas en la agitación, y que por otra parte no contenga un exceso de finos (menos de 40 % < 75 micrones), que dificulten la separación sólido-líquido posterior de la pulpa lixiviada. Debido a lo anterior y además para disminuir los consumos de energía por concepto de molienda y los costos de filtración y decantación, la agitación se deberá tratar de realizarla al mayor tamaño que la operación lo permita.

2.6.2. Tiempo de lixiviación

La economía del proceso de lixiviación es función del grado de disolución o porcentaje de extracción del mineral valioso. Sin embargo, esto no es tan importante como el tiempo necesario para una extracción aceptable, es decir la velocidad de disolución.

Figura 3. **Porcentaje de extracción en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Photoshop.

La figura 3 muestra una curva típica entre estos dos parámetros. Existe al principio una extracción rápida, que decrece posteriormente al máximo obtenible para un tamaño dado de partícula. Esta curva se puede obtener de pruebas de lixiviación en botellas en el laboratorio.

2.6.3. Mineralogía del mineral

El tamaño y la disposición de la especie valiosa influye el grado de molienda necesario para exponer esta especie a la solución lixivante.

2.7. Sistemas complejos

Al reaccionar un ion metálico con un anión o molécula neutra se forma un complejo, el cual puede tener carga positiva, negativa o neutra. La reacción por medio de la cual se forma un complejo se puede considerar como ácido-base de Lewis, en la que el ligando dona un par de electrones al catión. El ligando casi siempre se une al metal en forma covalente, aunque en algunos casos la interacción puede ser por atracción coulombica. En algunos complejos se dan con mucha rapidez, reacciones de sustitución y se dice que el complejo es lábil, mientras que si la reacción se verifica lentamente se les considera no lábiles o inertes. En complejometría, la velocidad de reacción depende de la naturaleza del reactante, del disolvente y del complejo.

Solo unos cuantos iones metálicos (Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+}) forman complejos estables con ligando nitrogenados como el amoníaco y el trien (trietilendriamina). Algunos otros iones metálicos (Al^{3+} , Pb^{2+} , Bi^{3+}) forman complejos más estables con ligando que contienen átomos de oxígeno como donadores de electrones. De estos agentes, el que mejor se conoce es el ácido etilendiaminotetracético, que con frecuencia se abrevia EDTA. El término quelante se ha propuesto como nombre general para este tipo de reactivos, esto incluye a las poliaminas (trien), los ácidos poliamino-carboxílicos (EDTA) y los compuestos afines que forman con los iones metálicos complejos solubles en agua en una proporción de 1:1 y que se puedan utilizar como titulantes de metales.

2.7.1. EDTA

El EDTA es un ligando que forma quelatos con un gran número de iones metálicos y es en esta versatilidad donde reside su importancia. Por comodidad

la forma ácida libre del EDTA se abrevia como H_4Y , donde H representa el número de hidrógenos ácidos y la Y al resto de moléculas. El ácido libre (H_4Y) y su sal monosódica (NaH_3Y) no se solubilizan por completo en agua, razón por la cual no se emplean como agentes valorantes, en cambio la sal disódica (Na_2H_2Y) es soluble y es la que se usa como agente valorante.

Durante la titulación del ion metálico con el Na_2H_2Y se liberan iones hidrógeno, el pH de la disolución es determinado por el ion central (metal presente en la titulación), sin embargo, el pH se puede ajustar de manera que solo una especie forme el complejo. En la tabla se da una lista de iones metálicos que pueden ser titulados con EDTA y el pH al cual se ajusta la disolución que los contiene.

Tabla I. **Condiciones de acidez en la cual los siguientes iones pueden ser titulados con EDTA**

pH	iones
$pH \leq 4$	$Fe^{3+}, In^{3+}, Th^{4+}, Sc^{2+}, Hg^{2+}, Ga^{3+}, Lu^{3+}$
$4 < pH < 7$	$VO^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Y^{3+}, Pb^{2+}, Sm^{3+}, Sn^{2+}, Cd^{2+}, Al^{3+}, Co^{2+}, La^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}$
$pH > 7$	$Ca^{2+}, Sr^{2+}, Mg^{2+}, Ba^{2+}$

Fuente: La teoría y la práctica en el laboratorio de Química Analítica I.

2.7.2. Enmascaramiento

En la disolución que contiene al ion metálico pueden estar presentes otras sustancias que no son quelantes y que puedan formar complejos con el metal y de esta forma compiten con la reacción de titulación. En realidad, esta formación de complejos algunas veces se utiliza en forma deliberada para evitar interferencias, y se le llama efecto enmascarante a la acción de la sustancia

que forma el complejo. En la tabla se indican algunos agentes enmascarante que se emplean para formar complejos.

Tabla II. **Sustancias empleadas como agente enmascarante**

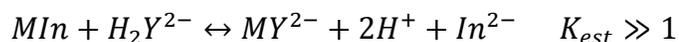
Agentes enmascarantes	Metales quelatados
CN-	Cd ²⁺ , Zn ²⁺ , Hg ²⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Pd ²⁺ , Pt ²⁺ , Fe ²⁺ y Fe ³⁺
F-	Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Ti ⁴⁺ y Be ²⁺
Trietanolamina	Al ³⁺ , Fe ³⁺ y Mn ²⁺
2,3-dimercaptopropanol	Bi ³⁺ , Cd ²⁺ , Cu ²⁺ , Hg ²⁺ y Pb ²⁺

Fuente: La teoría y la práctica en el laboratorio de Química Analítica I.

El desenmascaramiento se refiere a la liberación del ion metálico usando un tratamiento con formadehído. La selectividad de las operaciones de enmascaramiento, desenmascaramiento y control de pH permite la determinación de un analito en mezclas complejas de iones metálicos mediante titulaciones con EDTA.

2.7.3. Indicadores metalocrómicos

Los indicadores metalocrómicos son colorantes orgánicos que forman quelatos con iones metálicos, que son tan intensamente coloreados que permiten la detección visual en el intervalo de 10⁻⁶ a 10⁻⁷ M. Los complejos ion metálico-indicador (MIn) deben ser estables, pero menos que los correspondientes al metal-EDTA (MY²⁻) para que se pueda observar un cambio de color notable por el desplazamiento del ligando del complejo metal-indicador (MIn).



Cuando el complejo MIn no se disocia, se dice que el ion metálico implica bloquea al indicador. Los iones Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Ce^{3+} , Fe^{3+} y Al^{3+} bloquean al negro de ericromo T (ENT).

Para conseguir un punto final que sea satisfactorio, la reaccion de las constantes deben de tener como valor mínimo 10^4 .

$$\frac{K_{metal - ligando}}{K_{metal - indicador}} = 10^4$$

La mayoría de los indicadores de iones metálicos también funcionan como indicadores ácidos-base y desarrollan colores que se parecen a los de sus quelatos metálicos. Estos colorantes solo son útiles en el intervalo de pH donde la competencia por el proton no enmascara la reacción con el catión del analito. Por ejemplo, el eriocromo negro T es un ácido triprótico que presenta diferentes colores dependiendo de la especie presente y por consiguiente el pH de las soluciones.

Tabla III. **Indicadores metalocrómicos**

Indicadores	Cambio de color	Ión Titulado	pH
Calcon	Morado- azul marino	Ca^{2+} ,	12,0
3,3, dimetilnaftidina	Rosado-transparente	Zn^{2+}	5,5
Ácido sulfosalisílico	Vino tinto-amarillo pálido	Fe^{3+}	0,0
Ditizona	Azul - rojo	Al	4,5
Difenilamina	Transparente-morado	Fe^{2+}	0,00
Naranja de Xylenol	Rojo-amarillo oscuro	Zn^{2+}	5,5
	Amarillo-azul	Pb^{2+}	5,5
Ericromo Negro T	Verde-rojo	Ba^{2+}	10,5
	Azul-rojo	Ca^{2+} , Pb^{2+}	10,0
		Mg^{2+}	10,0
		Cd^{2+} ,	7,0-12,0
		In^{3+} , Mn^{2+}	8,0-10,0
		Zn^{2+}	7,0-10,0
	Rosa-violeta	Zr^{4+}	<1

Fuente: elaboración propia, referencia. 7.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para la recopilación de muestras se encuentran los factores que influyen en la evaluación del mineral que contienen el porcentaje de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo de ellas se encuentran las variables independientes, consideradas como las causas y las variables dependientes, consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de las variables independientes.

3.1.1. Variable independiente

- Tiempo de reacción de la solución.
- Masa del mineral de plomo y zinc en el tiempo (esfalerita-galena).
- Velocidad de reacción de la solución.
- Granulometría del mineral que contiene plomo y zinc (esfalerita-galena).
- Porcentaje de mineral de sulfato de zinc (*esfalerita*) y porcentaje de sulfato de plomo (galena).

3.1.2. Variable dependiente

- Porcentaje de humedad de mineral de zinc y plomo (esfalerita)
- Tiempo de secado del mineral

3.1.3. Factores constantes

- Temperatura
- Velocidad de reacción (rpm)

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: consumo industrial, agroindustrial y tratamientos de agua.
- Industria: “Representaciones Químicas S. A.” Guatemala
- Proceso: se determinó las concentraciones de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo en un mineral y se evaluó la cinética de reacción como una reacción múltiple en paralelo, empleando el método de lixiviación por agitación con cloruro férrico como reactante.
- Etapa de proceso: evaluación a nivel laboratorio de la cinética de reacción y las propiedades fisicoquímicas de un mineral que contiene sulfuro de plomo y sulfuro de zinc (galena y esfalerita) utilizando como reactante cloruro férrico para la obtención de cloruro de zinc y cloruro de plomo.
- Ubicación: el mineral que contiene sulfuro de plomo y sulfuro de zinc (galena y blenda) se encuentra ubicado en el departamento de Huehuetenango, Guatemala.

El análisis fisicoquímico de las propiedades del mineral de plomo y zinc se realizó en el área del Laboratorio de Control de Calidad “Representaciones Químicas S. A.”

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: María José Navarro y Navarro

Asesor: Inga. Qca. Lorena Victoria Pineda Cabrera

Co-Asesor: Br. Estuardo Morfin Serceño.

3.4. Recursos materiales disponibles

Para la evaluación a nivel laboratorio de la cinética de reacción y propiedades fisicoquímicas del mineral de que contiene sulfuro de plomo y sulfuro de zinc. Se utilizó el equipo de lixiviación por agitación en el Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

3.4.1. Materia prima e insumos

- Mineral que contiene sulfuro de plomo y sulfuro de zinc (galena y blenda).
- Cloruro férrico en solución al 37,54 %.

3.4.2. Cristalería, reactivos y equipo

- Cristalería
 - *Beacker* de 100, 250, 4 000 ml
 - Balones aforados de 250 y 1 000 ml
 - Vidrio de reloj
 - Termómetro de 150 °C
 - Espátulas
 - Embudos

- Piceta de polietileno
 - Gotero
 - Varillas de agitación
 - Buretas de 10 ml
 - Earlenmeyer de 250 y 500 ml
 - Pipetas serológica 5 y 10 ml
 - Pipetas volumétrica 5, 10, 25 ml
 - Probeta 10, 25, 50 y 100 ml
 - Crisol de Gooch
 - Papel filtro
 - Soportes universales y pinzas
 - Plancha de calentamiento marca Coming, voltaje: 120 V
 - Potenciómetro
 - Mechero
 - Balanzas analíticas marca Adventure, voltaje:8-15 v, máxima capacidad: 150 g lectura mínima 0,001 g
- Reactivo
 - Ácido sulfúrico grado reactivo
 - Ácido clorhídrico grado reactivo
 - Ácido nítrico grado reactivo
 - Ácido acético grado reactivo
 - Ácido sulfúrico al 25 % v/v
 - Ácido sulfúrico al 10 % v/v
 - Sulfato de zinc heptahidratado al 0,1 M
 - Solución buffer pH 10
 - Acetato de sodio 1M
 - Acetato de amonio al 10 %

- Acetato de amonio
- Alcohol etílico
- Dicromato de potasio al 0,1N
- Ferricianuro potásico al 1 %
- Fluoruro de amonio
- Hidróxido de potasio
- Hidróxido de sodio en lenteja
- Indicador 3,3 dimetilnaftidina
- Indicador ácido sulfosalísílico
- Indicador negro de ericromo T
- Indicador calcon
- Indicador ditizona
- Indicador difenilamina
- Indicador naranja de xylonon
- Mezcla de ácido fosfórico – ácido sulfúrico
- Solución de sal disódica de EDTA 0,1 M
- Agua desmineralizada

3.5. Técnica cuantitativa

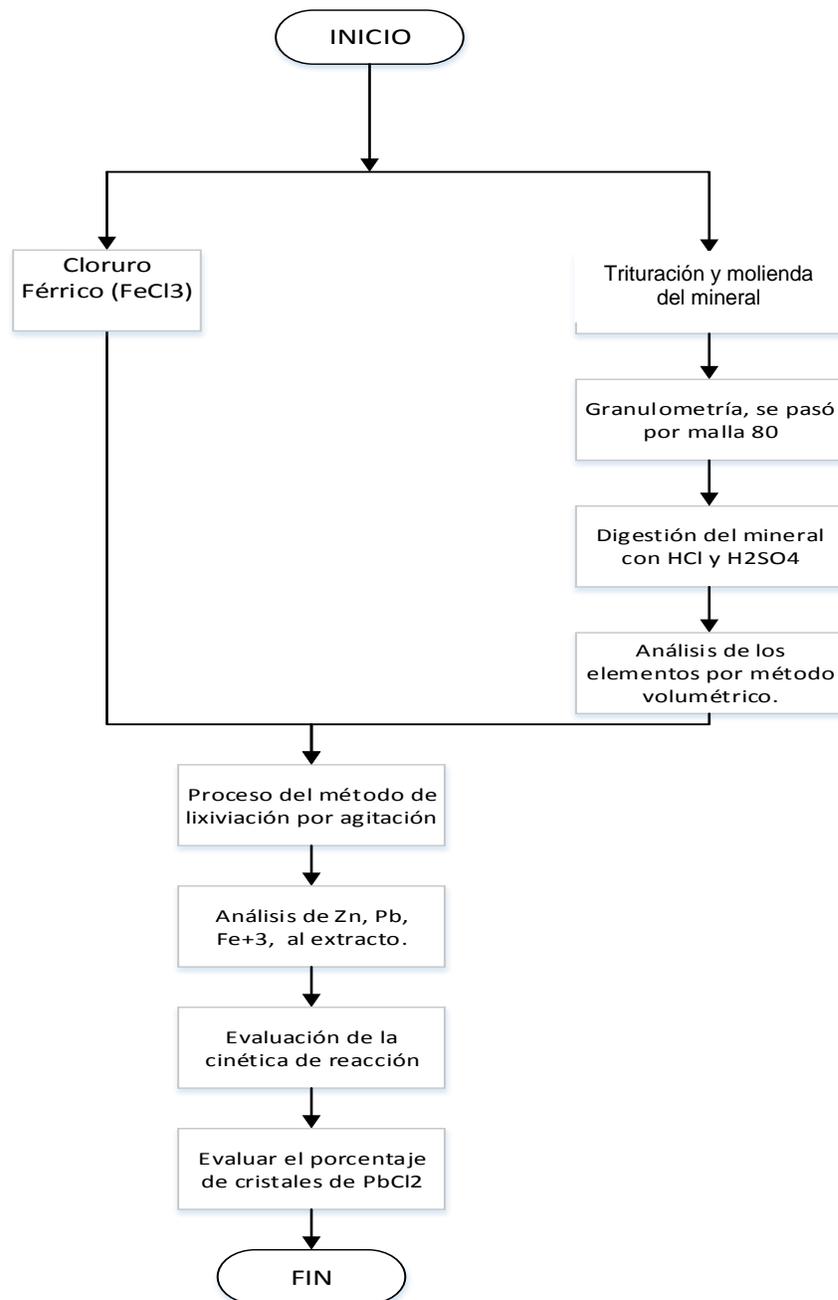
A continuación se describen la diversas formas de la técnica cuantitativa.

3.5.1. Desarrollo del método de lixiviación por agitación (sólido-liquido) para determinar la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc

Se determinó la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc realizando los siguientes pasos:

- Se obtuvo un mineral que contiene sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.
- Se trituró y se molió el mineral, pasándola a una granulometría malla núm. 80.
- Se digirió el mineral con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.
- Se analizó zinc y plomo por medio de métodos volumétricos de ambas digestiones.
- Se utilizó el método de lixiviación por agitación (sólido-líquido).
- Se obtuvo el extracto y se analizó zinc, plomo y hierro férrico por medio de métodos volumétricos.
- Se evaluó a nivel laboratorio la cinética de reacción de sulfuro de plomo (galena) y sulfuro de zinc (esfalerita) con cloruro férrico y se utilizó una reacción múltiple en paralelo.
- Se determinó el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales que se forman en el extracto mediante el filtrado en caliente.

Figura 4. Diagrama general a nivel laboratorio del proceso de producción para determinar la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc



Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Digestión del mineral con ácido sulfúrico y ácido clorhídrico

Se realizó la digestión al mineral con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico concentrado, se pesó el mineral en un *beacker* agregándole los ácidos respectivos y se calentó a ebullición por medio de mechero durante dos horas, al final de la reacción se filtró la solución para recuperá los insolubles y se aforó para realizar su respectivo análisis.

Posteriormente los insolubles que quedaron de la digestión con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico se colocan en la mufla para secarlos durante 2 horas a una temperatura de 100 °C. El contenido de insolubles del mineral es útil para los cálculos de balance de masa.

3.5.3. Método de análisis para determinar la concentración de zinc, plomo y los demás elementos en el mineral y el extracto

Por medio de los métodos de análisis volumétricos se obtuvo la concentración de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc que contiene el mineral digerida con ácido sulfúrico y ácido clorhídrico; también se determinó la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc que contiene el extracto.

Para determinar la concentración de zinc y magnesio, se agregó una alícuota de la solución a un *beacker*, el hierro férrico interfiere en el método de análisis. Posteriormente la solución se precipita con hidróxido de sodio hasta llevarlo a pH 5, se filtra en un Erlenmeyer agregándole agua desmineralizada hasta llevarlo a 100 ml, se titula con EDTA 0,1 M utilizando como indicador 3,3, dimetildiamina, la solución vira de rosado a transparente. Al final de la titulación

se calcula la concentración de zinc y posteriormente se agrega a la misma solución *buffer* pH 10, se utiliza como indicador Negro de ericromo T hasta que vira de color morado a azul marino, tomando el dato de la titulación final para determinar la concentración de magnesio.

Para determinar la concentración de calcio, se agrega una alícuota de la solución a un *beacker*, el hierro férrico, hierro ferroso, zinc, aluminio y magnesio interfieren en el método de análisis. Posteriormente la solución se precipita con hidróxido de sodio hasta llevarlo a pH 10, la solución se filtra en un Erlenmeyer agregándole agua desmineralizada hasta llevarlo a 100 ml, posteriormente se agrega hidróxido de potasio hasta llevarlo a pH 12, se titula con EDTA 0,1 M utilizando como indicador calcon la solución vira de morado a azul, tomando el dato de la titulación final determina la concentración de calcio.

Para determinar la concentración del aluminio, se agrega una alícuota de la solución en un Erlenmeyer, llevándolo con agua desmineralizada a 50 ml se debe llevar a pH 1 o 2 con hidróxido de sodio y se le agrega EDTA a 0,1 M, se coloca en el mechero y se lleva a ebullición durante 2 minutos se deja enfriar, se le agrega alcohol etílico, acetato de amonio y ácido clorhídrico hasta llevarlo a pH 4,5 se titula con sulfato de zinc 0,1 M y se utiliza ditizona, la solución vira de azul a rojo al final de la titulación determina la concentración del aluminio.

Para determinar la concentración de hierro férrico, se agrega una alícuota de la solución a un Erlenmeyer llevándolo con agua desmineralizada a 100 ml llevándolo a pH 2,5 y se agrega ácido sulfosalisílico se titula con EDTA 0,1 M la solución vira de corinto a amarillo pálido, al final de la titulación determina la concentración de hierro férrico.

Para determinar la concentración de hierro ferroso, se agrega una alícuota de la solución a un Erlenmeyer llevándolo con agua desmineralizada a 100 ml, se le agrega agua regia para llevarlo a pH 0, se titula con dicromato de potasio 0,1 M utilizando como indicador difenilamina la solución vira de transparente a morado, al final de la titulación se determina la concentración de hierro ferroso.

Para determinar la concentración de plomo total, se pesa una muestra del mineral en un *beacker* agregándole agua regia se calienta la solución hasta eliminar vapores nitrosos, después se agrega ácido sulfúrico al 25 % hasta aparición de vapores blancos densos evaporando hasta que quede una pasta, se agrega ácido sulfúrico concentrado y agua desmineralizada para disolver la pasta al finalizar la digestión la solución se enfría y se le agrega alcohol etílico dejándolo reposar durante 1 hora al finalizar la solución se filtra, el sulfato de plomo que queda en el papel filtro se lava con ácido sulfúrico al 10 % y agua desmineralizada caliente, se toma el papel filtro colocándolo en un *beacker* se le agrega buffer pH 5 y agua caliente para deshacer el papel filtro después se calienta durante 20 min, luego se filtra la solución en un Erlenmeyer y se lleva a 400 ml con agua caliente, se titula con EDTA 0,1 M utilizando como indicador naranja de xilenol la solución vira de rojo a amarillo oscuro, al final de la titulación determina la concentración de plomo.

Para determinar la concentración de plomo como carbonato, se pesa una muestra del mineral en un *beacker* agregándole ácido sulfúrico y agua desmineralizada se calienta la solución durante 45, minutos al finalizar la digestión la solución se enfría y se le agrega alcohol etílico dejándolo reposar durante 1 hora, al finalizar la solución se filtra, el sulfato de plomo que queda en el papel filtro se lava con ácido sulfúrico al 10 % y agua desmineralizada caliente, se toma el papel filtro colocándolo en un *beacker* se le agrega buffer pH 5 y agua caliente para deshacer el papel filtro, después se calienta durante

20 min para luego filtrar la solución en un Erlenmeyer y se lleva a 400 ml con agua caliente, se titula con EDTA 0,1 M utilizando como indicador naranja de xilenol, la solución vira de rojo a amarillo oscuro, al final de la titulación determina la concentración de plomo.

3.5.4. Método de lixiviación por agitación del mineral con cloruro férrico

Para determinar la concentración de cloruro de plomo y cloruro de zinc se utiliza el método de lixiviación, los insumos agregados del mineral y cloruro férrico son estequiométrico. El quipo es un Erlenmeyer de 250 ml, se coloca un tubo de polipropileno que tiene una perforación para la entrada del termómetro para unir el condensador y Erlenmeyer, el agitador y el condensador. El equipo se coloca en la plancha de calentamiento con agitación (ver ilustración 1). Se pesa 186 gramos de cloruro férrico, en un Erlenmeyer la solución se calienta hasta llegar a la temperatura correspondiente (90, 100 y 106 °C), se adicionan los 75 gramos del mineral, al momento de adicionarlo se forma efervescencia durando 5 minutos, esto solo pasa en la temperatura de 100 y 106 °C. Se detiene cada reacción a los 15, 30, 60, 120, 180, 240 y 300 minutos, al finalizar la reacción la solución se agrega a un proceso de enfriamiento para detener la reacción. Se realiza a cada corrida lavados de agua fría y caliente hasta llevarlo a 4 000 ml para recupera el cloruro de plomo

3.5.5. Determinación de la cinética de reacción y el orden de reacción utilizando el método diferencial de análisis de velocidad

Para determinar la cinética de reacción y el orden de reacción para sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico, se calcula por medio de

una reacción múltiple en paralelo utilizando el programa Polymath, se introducen las ecuaciones indicando el método de Newton de ecuaciones no lineales y se propone un valor inicial de 1. Con los datos experimentales de cloruro férrico que no reaccionó, sulfuro de zinc y sulfuro de plomo sirve para formar una matriz de ecuaciones no lineales para la velocidad neta de formación para cada especie, para encontrar la constante de velocidad, el orden de reacción y cloruro férrico no consumido para zinc y plomo.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación se en las tablas IV a la X se muestra la recolección y ordenamiento de la información.

3.6.1. Datos originales para determinar la concentración de plomo y zinc que contiene el mineral (galena y blenda) digerida con HCl y H₂SO₄

Por medio de métodos volumétricos se obtiene el datos de volumen para determinar la concentración de zinc, plomo y los demás elementos en la titulación de EDTA 0,1 M, sulfato de zinc 0,1 M y dicromato de potasio 0,1 N que contiene el mineral digerida con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.

Tabla IV. **Datos experimentales para determinar el porcentaje de los elementos de Zn, Mg, Ca y Fe+3 en el mineral digerido con ácido clorhídrico**

Elemento	corrida	Peso de la muestra (g)	Factor Estequiometrico	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración %
Zn	1	0,1254	6,547	0,099 27	4,65	24,10
	2	0,1258			4,68	24,18
	3	0,1256			4,67	24,17
	4	0,1255			4,68	24,24
	5	0,1256			4,68	24,22
Mg	1	0,1254	2,4305	0,097 7	0,1	0,189
	2	0,1258			0,09	0,170
	3	0,1256			0,09	0,170
	4	0,1255			0,09	0,170
	5	0,1256			0,09	0,170
Ca	1	0,1254	4,008	0,099 18	0,26	0,824
	2	0,1258			0,25	0,790
	3	0,1256			0,25	0,791
	4	0,1255			0,25	0,792
	5	0,1256			0,24	0,760
Fe+3	1	0,1254	5,585	0,106	0,36	1,700
	2	0,1258			0,42	1,977
	3	0,1256			0,43	2,027
	4	0,1255			0,42	1,981
	5	0,1256			0,46	2,168

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla V. **Datos experimentales para determinar la concentración de aluminio en el mineral digerido con ácido clorhídrico**

Elemento	Corrida	Peso de la muestra (g)	Factor estequiométrico	C _{ZnSO4} M	Volumen de ZnSO ₄ (ml)	Concentración %
Al	1	0,1254	2,698	0,09998	N/D	N/D
	2	0,1258			4,15	1,29
	3	0,1256			4,14	1,29
	4	0,1255			4,15	1,3
	5	0,1256			4,15	1,29

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla VI. **Datos experimentales para determinar la concentración de hierro ferroso en el mineral digerido con ácido clorhídrico**

Elemento	Corrida	Peso de la muestra (g)	Factor estequiométrico	C _{Dicromato de potasio} N	Volumen de Dicromato de potasio	Concentración %
Fe+2	1	0,1254	5,585	0,1003	0,56	2,502
	2	0,1258			0,55	2,449
	3	0,1256			0,56	2,498
	4	0,1255			0,54	2,410
	5	0,1256			0,54	2,408

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla VII. **Datos experimentales para determinar la concentración de Zn, Mg, Ca y Fe+3 en el mineral digerido con ácido sulfúrico**

Elemento	corrida	peso de la muestra (g)	Factor Estequiométrico	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración %
Zn	1	0,1256	6,547	0,09927	1,25	6,47
	2	0,1258			1,25	6,46
	3	0,1256			1,24	6,42
	4	0,1255			1,25	6,47
	5	0,1257			1,25	6,46
Mg	1	0,1256	2,4305	0,0977	0,13	0,246
	2	0,1258			0,14	0,264
	3	0,1256			0,13	0,246
	4	0,1255			0,13	0,246
	5	0,1257			0,14	0,264
Ca	1	0,1256	4,008	0,09918	0,25	0,791
	2	0,1258			0,25	0,790
	3	0,1256			0,25	0,791
	4	0,1255			0,24	0,760
	5	0,1257			0,26	0,822
Fe+3	1	0,1256	5,585	0,106	0,05	0,236
	2	0,1258			0,05	0,235
	3	0,1256			0,05	0,236
	4	0,1255			0,05	0,236
	5	0,1257			0,05	0,235

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla VIII. **Datos experimentales para determinar la concentración de aluminio en el mineral digerido con ácido sulfúrico**

Elemento	Corrida	Peso de la muestra (g)	Factor estequiométrico	C _{ZnSO₄} M	Volumen de ZnSO ₄ (ml)	Concentración %
Al	1	0,1256	2,698	0,099 98	7,47	0,97
	2	0,1258			7,46	0,98
	3	0,1256			7,44	0,96
	4	0,1255			7,46	0,97
	5	0,1257			7,46	0,97

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla IX. **Datos experimentales para determinar la concentración de hierro ferroso en el mineral digerido con ácido sulfúrico**

Elemento	Corrida	Peso de la muestra (g)	Factor estequiométrico	C _{Dicromato de potasio N}	Volumen de Dicromato de potasio	Concentración %
Fe+2	1	0,1256	5,585	0,1003	0,8	3,568
	2	0,1258			0,8	3,562
	3	0,1256			0,8	3,568
	4	0,1255			0,8	3,571
	5	0,1257			0,79	3,521

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla X. **Datos experimentales para determinar la concentración de plomo total y como carbonato en el mineral**

Digestión	Corrida	Peso inicial del mineral (g)	Factor estequiométrico	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de Pb %
HCl/ HNO ₃ /H ₂ SO ₄	1	1,0227	20,719	0,1014	5,10	10,48
	2	1,0488			5,15	10,32
	3	1,0357			5,13	10,41
	4	1,0292			5,12	10,45
	5	5,0247			24,74	10,41
H ₂ SO ₄	1	1,0647			3,46	6,83
	2	1,0111			3,00	7,13
	3	1,0379			3,23	7,01
	4	1,0513			3,35	6,99
	5	5,004			16,55	6,99

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

3.6.2. **Datos originales para determinar el efecto de la temperatura en función de la concentración de la eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral**

Por medio de métodos volumétricos se obtiene el dato del volumen en la titulación con EDTA a 0,1 M, para determinar la concentración de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral a diferentes temperaturas que son 90, 100, 106 °C.

Tabla XI. **Insumos del mineral y cloruro férrico agregado en las lixiviaciones**

Insumos	Porcentaje	Gramos agregados
Zinc	17,71 %	13,283 g
Plomo	3,42 %	2,565 g
Mineral		75 g
Cloruro férrico en solución		186 g

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XII. **Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Tara de Erlenmeyer más agitador (g)	Insolubles reales (g)	Peso de la solución +tara + Insolubles (g)	Peso final de la solución Total del extracto (g)
300	1	155	52,95	413	205,05
	2		51,99	412	205,01
	3		53,99	414	205,01
	4		53,89	414	205,11
	5		52,90	413	205,10

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIII. **Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Peso de muestra del extracto (g)	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de zinc en el extracto (%)	Peso final del extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto (g)
300	3,244	0,0998	2,34	4,713	205,050	9,664
	3,224		2,33	4,722	205,010	9,680
	3,248		2,34	4,707	205,010	9,650
	3,253		2,32	4,659	205,110	9,557
	3,226		2,34	4,740	205,100	9,722

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIV. **Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Tara de Erlenmeyer más agitador (g)	Insolubles reales (g)	Peso de la solución +tara + Insolubles (g)	Peso final de la solución concentrada (g)
300	1	155	51,9006	413	206,10
	2		51,9080	413	206,09
	3		51,9340	413	206,07
	4		51,1230	413	206,88
	5		51,5676	413	206,43

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XV. **Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Peso de muestra del extracto (g)	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de zinc en el extracto (%)	Peso final del extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto (g)
300	3,16562	0,0998	2,54	5,243	206,099	10,805
	3,24117		2,55	5,141	206,092	10,594
	3,26477		2,55	5,103	206,066	10,516
	3,28138		2,54	5,058	206,877	10,463
	3,25720		2,54	5,095	206,432	10,518

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVI. **Datos experimentales para determinar la solución total del extracto a la temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Tara de Erlenmeyer más agitador (g)	Insolubles reales (g)	Peso de la solución + tara + Insolubles (g)	Peso final de la solución concentrada (g)
300	1	145	50,9905	401	205,01
	2		50,8780	401	205,12
	3		50,5445	401	205,46
	4		50,4343	401	205,57
	5		50,9905	401	205,01

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVII. **Datos experimentales para determinar los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Peso Inicial del mineral (g)	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de zinc en el extracto (%)	Peso final del extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto (g)
300	3,289	0,1028	2,90	5,933	205,010	12,164
	3,290		2,95	6,033	205,122	12,375
	3,295		2,95	6,025	205,456	12,378
	3,298		2,90	5,917	205,566	12,164
	3,289		2,90	5,933	205,010	12,164

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVIII. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de cristales en el extracto	Peso de muestra de cristales	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de Plomo en los cristales (%)	Gramos de plomo en los cristales (g)
300	1	3,2773	0,5016	0,0998	16,200	66,782	2,189
	2	3,261	0,5034		16,200	66,543	2,170
	3	3,271	0,5012		16,200	66,835	2,186
	4	3,270	0,5014		16,200	66,808	2,185
	5	3,271	0,5089		16,400	66,636	2,180

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIX. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 90°C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de muestra del extracto (g)	C _{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Porcentaje de plomo en el extracto (%)	Peso final del extracto (g)	Gramos de plomo en el extracto (g)
300	1	11	0,0998	7,520	1,452	205,050	2,9783
	2			7,510	1,451	205,010	2,9738
	3			7,520	1,452	205,010	2,9777
	4			7,500	1,449	205,110	2,9712
	5			7,520	1,452	205,100	2,9790

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XX. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de cristales en el extracto (g)	Peso de muestra de cristales (g)	C_{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de plomo en los cristales (%)	Gramos de plomo en los cristales (g)
300	1	4,4100	0,5216	0,0998	16,800	66,600	2,937
	2	4,4100	0,5034		16,200	66,543	2,935
	3	4,3900	0,5012		16,200	66,835	2,934
	4	4,3954	0,5014		16,200	66,808	2,936
	5	4,4033	0,5089		16,400	66,636	2,934

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXI. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de muestra del extracto (g)	C_{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Porcentaje de plomo en el extracto (%)	Peso final de la solución (g)	Gramos de plomo en el extracto (g)
300	1	10,465	0,0998	5,850	1,156	206,099	2,3821
	2	10,762		5,850	1,124	206,092	2,3164
	3	10,762		5,850	1,124	206,066	2,3161
	4	10,759		5,850	1,124	206,877	2,3258
	5	10,761		5,850	1,124	206,432	2,3203

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXII. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en los cristales a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de cristales en el extracto	Peso de muestra de cristales	C_{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de plomo en los cristales (%)	Gramos de plomo en los cristales (g)
300	1	4,9772	0,5100	0,1028	16,050	67,030	3,336
	2	4,9787	0,5145		16,200	67,064	3,339
	3	4,9983	0,5167		16,200	66,779	3,338
	4	4,9134	0,5099		16,200	67,669	3,325
	5	4,9324	0,5156		16,400	67,747	3,342

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXIII. **Datos experimentales para determinar los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Peso de muestra del extracto (g)	C_{EDTA} M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de plomo en el extracto (%)	Peso final del extracto (g)	Gramos de plomo en el extracto (g)
300	1	10,880	0,0998	5,340	1,014	205,010	2,0797
	2	10,889		5,330	1,012	205,122	2,0761
	3	10,904		5,340	1,013	205,456	2,0804
	4	10,913		5,320	1,008	205,566	2,0719
	5	10,884		5,320	1,011	205,010	2,0719

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

3.6.3. Datos originales para determinar la velocidad de reacción y el orden de reacción

Por medio de métodos volumétricos se obtiene el dato del volumen en la titulación con EDTA a 0,1 M, para calcular la concentración cloruro férrico, sulfuro de plomo y sulfuro de zinc, a los diferentes tiempos a una temperatura de 106 °C para calcular la velocidad de reacción y el orden de reacción.

Tabla XXIV. Datos experimentales para determinar los gramos de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto

Tiempo (min)	Peso final del extracto diluido (g)	Peso de la muestra del extracto (g)	CEDTA M	Volumen de EDTA (ml)	Concentración de Fe+3 en el extracto (%)	Gramos de Fe+3 en el extracto (%)	Gramos de FeCl3 en el extracto (%)
15	3906,00	6,030	0,1010	2,78	0,2601	10,158	29,503
30	3754,00	6,011	0,1010	2,05	0,1924	7,222	20,975
60	3963,43	6,081	0,0998	1,12	0,1027	4,069	11,818
120	3835,37	6,007	0,1011	0,60	0,0563	2,161	6,276
180	3691,83	6,008	0,1011	0,60	0,0563	2,080	6,040
240	3719,47	6,034	0,1010	0,15	0,0140	0,522	1,515
300	3767,46	6,044	0,1050	0,09	0,0087	0,329	0,955

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXV. Datos experimentales para determinar la concentración de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto

Tiempo (min)	Gramos de FeCl3 en el extracto (g)	Moles de FeCl3 en el extracto	Volumen de extracto (dm3)	Concentración de cloruro férrico (mol/dm3)
15	29,503	0,182	0,157	1,159
30	20,975	0,129	0,157	0,824
60	11,818	0,073	0,157	0,464
120	6,276	0,039	0,157	0,246
180	6,040	0,037	0,157	0,237
240	1,515	0,009	0,157	0,059
300	0,955	0,006	0,157	0,038

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXVI. **Datos experimentales para determinar la constante de velocidad química y el orden de reacción**

Tiempo	Concentración de sulfuro de zinc	Concentración de sulfuro de plomo	Concentración de cloruro férrico	Velocidad de reacción $-r_{A^*}$ 100
min	(mol/dm ³)	(mol/dm ³)	(mol/dm ³)	(mol/dm ³ *min)
0	1,294	0,1718	2,742	9,228
15	0,685	0,0221	1,158	3,198
30	0,566	0,0144	0,823	0,766
60	0,445	0,0108	0,469	0,320
120	0,310	0,0031	0,246	0,097
180	0,156	0,0009	0,237	0,078
240	0,135	0,0006	0,059	0,047
300	0,129	0,0003	0,038	-0,048

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXVII. **Ecuaciones no lineales para determinar la constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath**

Tiempo	Ecuación
min	$-r_B = -\frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A^{\alpha 1} C_{B1}^{\beta 1} + k_2 C_F^{\alpha 2} (C_B - C_{B1})^{\beta 2}$
0	$9.228 = x * 1.294^z w^k + y * 0.1728^a (2.742 - w)^b$
15	$3.198 = x * 0.685^z w^k + y * 0.0221^a (1.158 - w)^b$
30	$0.766 = x * 0.566^z w^k + y * 0.0144^a (0.823 - w)^b$
60	$0.32 = x * 0.445^z w^k + y * 0.0108^a (0.469 - w)^b$
120	$0.097 = x * 0.31^z w^k + y * 0.0031^a (0.246 - w)^b$
180	$0.078 = x * 0.156^z w^k + y * 0.0009^a (0.237 - w)^b$
240	$0.047 = x * 0.135^z w^k + y * 0.0006^a (0.059 - w)^b$

Fuente: elaboración propia, con base a la sección 3.6.3, tabla XXXI al XXXIII.

Tabla XXVIII. **Despeje de ecuación no lineal para determinar la constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath**

Incógnitas	Ecuación
$K_1=X$	$f(x) = ((0,77280)/(k*w*z)) * (0,1728*a*b*y*(w-2,742)+9,228)$
$K_2=y$	$f(y) = ((45,249)/(a*b*(w-1,158))) * (0,685*k*w*x*z-3,198)$
$\alpha_1=z$	$f(z) = ((1,7668)/(k*w*x)) * (0,0144*a*b*y*(w-0,823)+0,766)$
$\alpha_2=a$	$f(a) = ((92,593)/(b*y*(w-0,469))) * (0,445*k*w*x*z-0,32)$
$\beta_2=b$	$f(b) = ((322,58)/(a*y)) * ((0,31*k*w*x*z-0,097)/(w-0,246))$
$CB_1=W$	$f(w) = ((711,0*a*b*y-2,6*105)/(3\ 000,0*a*b*y-5,2*105*k*x*z))$
$\beta_1=k$	$f(k) = ((7,4074)/(w*x*z)) * (0,0006*a*b*y*(w-0,059)+0,047)$

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

3.6.4. Datos originales para determinar el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales

En las tablas XXIX y XXX se muestran datos originales para determinar el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales.

Tabla XXIX. **Datos experimentales para determinar los gramos de cristales de cloruro de plomo**

Corrida	Peso final de cristales + papel (g)	Peso inicial del papel (g)	Cristales de PbCl ₂ (g)
1	1,7378	1,0898	0,6480
2	1,7230	1,0353	0,6877
3	1,7206	1,0672	0,6534
4	1,7233	1,0876	0,6357
5	1,7289	1,0656	0,6633

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXX. **Condiciones de temperatura para determinar el porcentaje de cristales de cloruro de plomo**

Descripción	Valores
Temperatura de separación	80 °C
Temperatura de finalización	77 °C
Floculante	20 ml

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Representaciones Químicas, S. A.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se tabula el ordenamiento y procesamiento de la información.

3.7.1. Concentración de los elementos que contiene el mineral digerida con HCl y H₂SO₄

Se utilizó el método de análisis volumétrico para determinar la concentración de los elementos (Zn, Mg, Ca, Al, Fe⁺², Fe⁺³) que contiene el mineral digerido con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.

Tabla XXXI. **Concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido clorhídrico**

Elemento	Corrida	Concentración %	Concentración Promedio (%)
Zn	1	24,100	24,179
	2	24,180	
	3	24,170	
	4	24,240	
	5	24,220	
Mg	1	0,189	0,174
	2	0,170	
	3	0,170	
	4	0,170	
	5	0,170	
Ca	1	0,824	0,791
	2	0,790	
	3	0,791	
	4	0,792	
	5	0,760	
Al	1	N/D	1,293
	2	1,29	
	3	1,29	
	4	1,300	
	5	1,290	
Fe+2	1	2,502	2,453
	2	2,449	
	3	2,498	
	4	2,410	
	5	2,408	
Fe+3	1	1,700	1,970
	2	1,977	
	3	2,027	
	4	1,981	
	5	2,168	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.1 tablas IV a la VI.

Tabla XXXII. **Análisis estadístico de la concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido clorhídrico**

Elemento	VARIANZA	DESVIACIÓN EST	Número de medias
Zn	0,0022268	4,72E-02	5
Mg	5,9229E-05	7,70E-03	5
Ca	0,000418	2,04E-02	5
Al	0,00001875	4,33E-03	5
Fe+2	0,00163494	4,04E-02	5
Fe+3	0,02316283	1,52E-01	5

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.1. tabla XXXI.

Tabla XXXIII. **Concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido sulfúrico**

Elemento	Corrida	Concentración %	Concentración Promedio (%)
Zn	1	6,470	6,456
	2	6,460	
	3	6,420	
	4	6,470	
	5	6,460	
Mg	1	0,246	0,253
	2	0,264	
	3	0,246	
	4	0,246	
	5	0,264	
Ca	1	0,791	0,791
	2	0,790	
	3	0,791	
	4	0,760	
	5	0,822	
Al	1	0,970	0,970
	2	0,980	
	3	0,960	
	4	0,970	
	5	0,970	

Continuación de la tabla XXXIII.

Fe+2	1	3,568	3,558
	2	3,562	
	3	3,568	
	4	3,571	
	5	3,521	
Fe+3	1	0,236	0,236
	2	0,235	
	3	0,236	
	4	0,236	
	5	0,235	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.1 tabla VII a la IX.

Tabla XXXIV. **Análisis estadístico de la concentración de los elementos en el mineral digerido con ácido sulfúrico**

Elemento	VARIANZA	DESVIACIÓN EST	Número de medias
Zn	4,13E-04	2,03E-02	5
Mg	8,23E-05	9,07E-03	5
Ca	3,85E-04	1,96E-02	5
Al	4,00E-05	6,32E-03	5
Fe+2	3,57E-04	1,89E-02	5
Fe+3	3,66E-08	1,91E-04	5

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.1. tabla XXXIII.

Tabla XXXV. **Concentración de plomo en el mineral**

Digestión	Corrida	Concentración Pb (%)	Concentración promedio de Pb (%)
HCl/ HNO3/H2SO4	1	10,48	10,412
	2	10,32	
	3	10,41	
	4	10,45	
	5	10,41	
H2SO4	1	6,83	6,989
	2	7,13	
	3	7,01	
	4	6,99	
	5	6,99	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.1 tabla X.

Tabla XXXVI. **Análisis estadístico de la concentración de plomo en el mineral**

Digestión	VARIANZA	DESVIACION EST	Número de medias
HCl/ HNO3/H2SO4	2,99E-03	5,47E-02	5
H2SO4	9,29E-03	9,64E-02	5

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.1. tabla XXXV.

3.7.2. **Concentración de la eficiencia de conversión del sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral**

Se determinó la concentración de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral a diferentes temperaturas, que son 90, 100, 106 °C.

Tabla XXXVII. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 90 °C**

Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto promedio (g)	Gramos de zinc en el extracto esperado (g)	Concentración de eficiencia (%)
1	9,664	9,655	13,283	72,687 %
2	9,680			
3	9,650			
4	9,557			
5	9,722			

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2. tablas XII y XIII.

Tabla XXXVIII. **Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACIÓN EST
300	1	9,664	0,002963199	5,44E-02
	2	9,680		
	3	9,650		
	4	9,557		
	5	9,722		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2. tabla XXXVII.

Tabla XXXIX. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto promedio (g)	Gramos de zinc en el extracto esperado (g)	Concentración de eficiencia (%)
300	1	10,805	10,579	13,283	79,649 %
	2	10,594			
	3	10,516			
	4	10,463			
	5	10,518			

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2, tablas XIV y XV.

Tabla XL. **Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACIÓN EST
300	1	10,805	0,014470037	1,20E-01
	2	10,594		
	3	10,516		
	4	10,463		
	5	10,518		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2, tabla XXXIX.

Tabla XLI. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	Gramos de zinc en el extracto promedio (g)	Gramos de zinc en el extracto esperado (g)	Concentración de eficiencia (%)
300	1	12,164	12,249	13,283	92,219 %
	2	12,375			
	3	12,378			
	4	12,164			
	5	12,164			

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2, Tablas XVI y XVII.

Tabla XLII. **Análisis de estadístico de los gramos de zinc en el extracto a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de zinc en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACIÓN EST
300	1	12,164	0,010842388	1,04E-01
	2	12,375		
	3	12,378		
	4	12,164		
	5	12,164		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2, tabla XLI.

Tabla XLIII. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Gramos de plomo en los cristales promedio (g)	Gramos de plomo en el extracto promedio (g)	Gramos de plomo total en el extracto (g)	Gramos esperado en el extracto	Concentración de eficiencia (%)
300 min	2,182	2,976	5,15784457	5,22099	98,791 %

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2, tablas XVIII y XIX.

Tabla XLIV. **Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 90 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de plomo en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACION EST
300	1	2,9783	9,00065E-06	3,00E-03
	2	2,9738		
	3	2,9777		
	4	2,9712		
	5	2,9790		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2, tabla XLIII.

Tabla XLV. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Gramos de plomo en los cristales promedio (g)	Gramos de plomo en el extracto promedio (g)	Gramos de plomo total en el extracto (g)	gramos esperado en el extracto	Concentración de eficiencia (%)
300 min	2,935	2,332	5,267	5,3223	98,969 %

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2, tablas XX y XXI.

Tabla XLVI. **Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 100 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de plomo en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACION EST
300	1	2,3821	0,000636681	2,52E-02
	2	2,3164		
	3	2,3161		
	4	2,3258		
	5	2,3203		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2, tabla XLV.

Tabla XLVII. **Concentración de eficiencia en la conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Gramos de plomo en los cristales promedio (g)	Gramos de plomo en el extracto promedio (g)	Gramos de plomo total en el extracto (g)	Gramos esperado en el extracto (g)	Concentración de eficiencia (%)
300 min	3,336	2,076	5,412	5,4189	99,871 %

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2, tablas XXII y XXIII.

Tabla XLVIII. **Análisis de estadístico de los gramos de plomo en el extracto a una temperatura de 106 °C**

Tiempo (min)	Corrida	Gramos de plomo en el extracto (g)	VARIANZA	DESVIACIÓN EST
300	1	2,0797	1,33116E-05	3,65E-03
	2	2,0761		
	3	2,0804		
	4	2,0719		
	5	2,0719		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7.2, tabla XLVII.

3.7.3. Concentración de sulfuro de zinc, sulfuro de plomo y cloruro férrico para determinar la velocidad de reacción química

En las tablas XLIX y L se puede observar la concentración de sulfuro de zinc, sulfuro de plomo y cloruro férrico para determinar la velocidad de reacción química.

Tabla XLIX. **Velocidad de reacción en función de cloruro férrico que no reaccionó en el extracto**

Tiempo min	Concentración de cloruro férrico (mol/dm ³)	Velocidad de reacción r_{B^*} 100 (mol/dm ³ *min)	Velocidad de reacción – r_{B^*} 100 (mol/dm ³ *min)
0	2,742	-0,09228	9,228
15	1,158	-0,03198	3,198
30	0,823	-0,00766	0,766
60	0,469	-0,00320	0,320
120	0,246	-0,00097	0,097
180	0,237	-0,00078	0,078
240	0,059	-0,00047	0,047
300	0,038	0,00048	-0,048

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, tablas XXIV y XXV.

Tabla L. **Constante de velocidad y el orden de reacción utilizando Polymath**

Incógnitas	Ecuación	Valor Inicial	Resultado
K1	-8,052E+07	1	0,6893
K2	-8,896E+06	1	0,1116
α_1	7,56E+05	1	3,1459
α_2	-7,753E+08	1	1,2894
β_2	5,314E+06	1	0,1274
CB1	9,7014732	1	3,0000
β_1	-8358,4712	1	0,0690

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, tablas XXVI a la XXVIII.

3.7.4. Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales

Se determinó el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales pesando la masa inicial y masa final del filtrado en caliente, para determinar los gramos de cristales de cloruro de plomo recuperados por decantación.

Tabla LI. Gramos de cloruro de plomo en cristales recuperados a una temperatura de 106 °C

Corrida	Cristales de PbCl ₂ (g)	Cristales de PbCl ₂ recuperados(g)
1	0,6480	0,65762
2	0,6877	
3	0,6534	
4	0,6357	
5	0,6633	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, tabla XXIX.

Tabla LII. Análisis de estadístico del porcentaje de cristales de cloruro de plomo a una temperatura de 106 °C

Corrida	% de cloruro de plomo	VARIANZA	DESVIACIÓN EST
1	0,32 %	9,6E-09	9,80E-05
2	0,34 %		
3	0,32 %		
4	0,31 %		
5	0,32 %		

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, tabla XXIX.

3.7.5. Análisis estadístico para la comprobación de la hipótesis

En las tablas LIII a la LVI se presenta el análisis estadístico para la comprobación de la hipótesis.

Tabla LIII. **Prueba de Fisher para varianza de dos muestras para la concentración de conversión sulfuro de zinc a cloruro de zinc al cambiar de temperatura**

	Variable 1	Variable 2
Media	98,67	81,52
Varianza	65,33	98,00
Observaciones	3	3
Grados de libertad	2	2
F	0,6667	
P(F<=f) una cola	0,4000	
Valor crítico para F (una cola)	0,0526	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección de resultados, tabla XXX.

Tabla LIV. **Prueba de Fisher para varianza de dos muestras para la concentración de conversión sulfuro de plomo a cloruro de plomo al cambiar de temperatura**

	Variable 1	Variable 2
Media	98,67	99,21
Varianza	65,33	0,34
Observaciones	3	3
Grados de libertad	2	2
F	194,86	
P(F<=f) una cola	0,005106	
Valor crítico para F (una cola)	19	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección de resultados, tabla XXX.

Tabla LV. **Prueba de *t*-Student para muestras suponiendo varianzas desiguales para la concentración de conversión sulfuro de zinc al cambiar de temperatura**

	Variable 1	Variable 2
Media	98,67	81,52
Varianza	65,33	98,00
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	2,32	
P(T<=t) una cola	0,04	
Valor crítico de t (una cola)	2,13	
P(T<=t) dos colas	0,08	
Valor crítico de t (dos colas)	2,78	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección resultados, tablas XXXVII a la XLVII.

Tabla LVI. **Prueba de *t*-Student para muestras suponiendo varianzas desiguales para la concentración de conversión de sulfuro de plomo al cambiar de temperatura**

	Variable 1	Variable 2
Media	98,67	99,21
Varianza	65,33	0,34
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,1162	
P(T<=t) una cola	0,4591	
Valor crítico de t (una cola)	2,9200	
P(T<=t) dos colas	0,9181	
Valor crítico de t (dos colas)	4,3027	

Fuente: elaboración propia, con base en la sección resultados, tablas XXXVII a la XLVII.

3.8. Análisis estadístico

Ahora se procederá a demostrar el análisis estadístico con base en los datos obtenidos anteriormente.

3.8.1. Número de repeticiones

El número de repeticiones indica la cantidad necesaria de corridas que deben de realizarse para una mejor manipulación de datos, resultados y errores. Así como también, permite organizar el tiempo que se dispone durante la realización de la práctica.

El número de corridas se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{z^2 \frac{\alpha^2}{2} pq}{e^2}$$

Donde:

n = número de corridas

$z \frac{\alpha}{2}$ = valor estadístico de la curva normal de frecuencia

p = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso

e = estimación del error

Para la práctica se estima un error del 20 % con una probabilidad de éxito del 95 % y de fracaso de 5 %. Obteniendo un valor de Z de 1,95.

$$n = \frac{1,95^2 \times 0,95 \times 0,05}{0,20^2} = 4,51 \cong 5$$

Nota: el número de repeticiones a realizar en la investigación para obtener a partir de la temperatura y tiempo el cloruro de zinc y plomo que será de 5 veces.

3.8.2. Variables de respuestas

- Media aritmética

Para cada experimento se determinó el promedio o la media de los siete datos pertenecientes a cada análisis, para comparar los valores entre ellos y encontrar el valor medio, determinando así los parámetros de diseño del equipo.

Dadas las observaciones de una muestra x_1, x_2, \dots, x_n la media de la muestra denotada con \bar{x} es:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

3.8.3. Varianza y desviación estándar

La muestra x_1, x_2, \dots, x_n y media \bar{x} , la varianza de la muestra denotada con S^2 está dada por

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

La desviación estándar de la muestra denotada con S , es la raíz cuadrada positiva de S^2 ,

$$S = \sqrt{S^2}$$

Los grados de libertad asociados con la varianza estimada es $n - 1$.

3.8.4. Prueba de hipótesis para la comparación de medias

A continuación, se muestra la prueba de hipótesis para la comparación de medias.

3.8.4.1. Prueba de F de Snedecor-Fisher

En una prueba estadística empleada para la comparación de varianzas sean dos conjuntos de datos:

$\{x_1\}$ con varianza S_1^2 y tamaño n_1

$\{x_2\}$ con varianza S_2^2 y tamaño n_2

Se considera la hipótesis nula si se dice que las varianzas no presentan diferencia significativa entre sí. $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Si $S_2^2 \geq S_1^2$, $F = S_2^2 / S_1^2 \geq 1$. Se compara con $F_{tab}(0,05, n_2-1, n_1-1)$. Si $F < F_{tab}$ se admite H_0 .

3.8.4.2. Prueba t de Student

Comparación de valores medios de dos conjuntos de datos.

Tabla LVII. **Dados dos conjuntos de datos**

Conjunto	Media	Varianza	Número de datos
1	\bar{x}_1	S_1^2	n_1
2	\bar{x}_2	S_2^2	n_2

Fuente: elaboración propia.

Para decidir si las medias muestrales \bar{x}_1 y \bar{x}_2 difiere significativamente se toma la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$.

Primero se comprueba que $s_1^2 = s_2^2$ mediante la prueba F de Fisher. Así se tienen dos posibilidades:

- Si $s_1^2 = s_2^2$ se calcula una varianza promedio

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Se calcula el estadístico de t:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Si $t < t_{crit}$ se acepta la hipótesis nula, es decir, las dos medias son estadísticamente iguales.

- Si $s_1^2 \neq s_2^2$ se calcula el estadístico t como:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Ahora los grados de libertad se deben calcular como:

$$V_{eff} = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1 - 1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2 - 1)}\right)}$$

El valor de t se compara con $t(0.05, V_{eff})$

Dónde:

t = valor t Student

\bar{X} = media muestral

S = desviación muestral

n_i = número de muestras

El valor obtenido de la ecuación anterior será comparado con el valor en la tabla de t de student con un grado de confiabilidad del 95 %. Si el valor absoluto de la ecuación es menor que el valor de la tabla de t de Student se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.

3.8.5. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Excel 2007:
Hoja de cálculo electrónica utilizada para automatizar diversas operaciones matemáticas.

- Microsoft Visio 2007: software que facilita la elaboración de diagramas de flujo tanto de equipos como de sistemas completos.

4. RESULTADOS

4.1. Concentración de zinc y plomo en forma de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo contenidos en el mineral

En las tablas LVIII a la LX se muestra la concentración de zinc y plomo en forma de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo contenidos en el mineral.

Tabla LVIII. **Concentración de los elementos que contiene el mineral digerida con ácido clorhídrico**

Elemento	Concentración (%)
Fe ⁺³	1,97
Fe ⁺²	2,45
Al	1,29
Mg	0,17
Zn	24,18
Ca	0,79
Pb	10,41
Insolubles	33,61

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.1 tablas IV a la VI.

Tabla LIX. **Concentración de los elementos que están como carbonato en el mineral digerida con ácido sulfúrico**

Elemento	Concentración (%)
Fe ⁺³	0,23
Fe ⁺²	3,56
Al	0,97
Mg	0,25
Zn	6,47

Continuación de la tabla LIX.

Ca	0,79
Pb	6,99
Insolubles	75,12

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.1 tablas VII a la IX.

Tabla LX. **Concentración de los elementos entre ambas digestiones que contiene el mineral**

Elemento	Concentración (%)
Fe ₂ O ₃	0,33
Fe ₂ S ₃	3,24
FeO	4,58
FeS	No detectable
Al ₂ O ₃	1,83
MgCO ₃	0,87
ZnCO ₃	12,39
ZnS	26,40
CaCO ₃	1,97
PbCO ₃	9,01
PbS	3,95
Insolubles	33,61
Humedad	0,90

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 4.1 tablas LIV y LV.

4.2. **Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo a cloruro de zinc y cloruro de plomo**

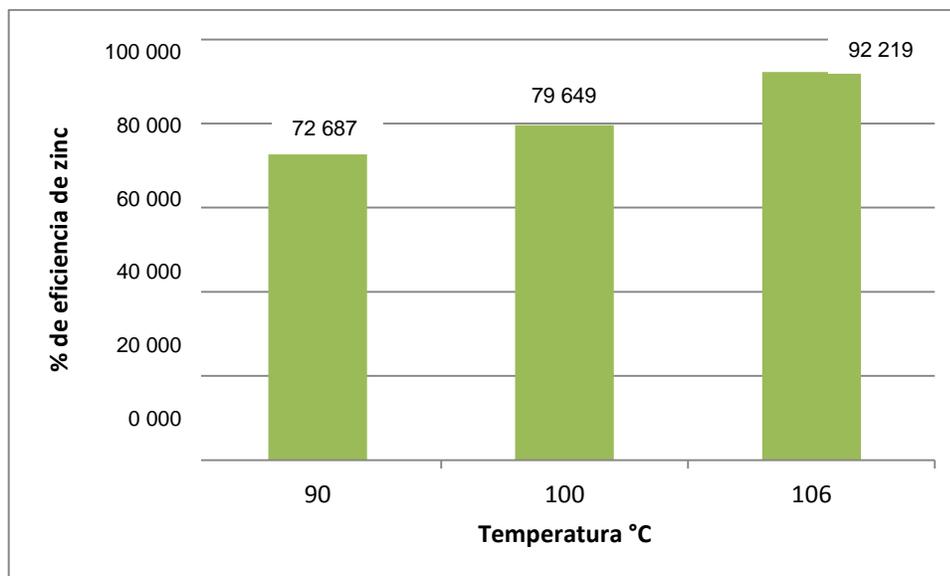
En las tabla LXI se muestra el efecto de la temperatura sobre la eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo a cloruro de zinc y cloruro de plomo

Tabla LXI. **Eficiencia de conversión de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas**

Temperatura	Concentración de la eficiencia de Zn	Concentración de la eficiencia de Pb
90	72,687 %	98,791 %
100	79,649 %	98,969 %
106	92,219 %	99,871 %

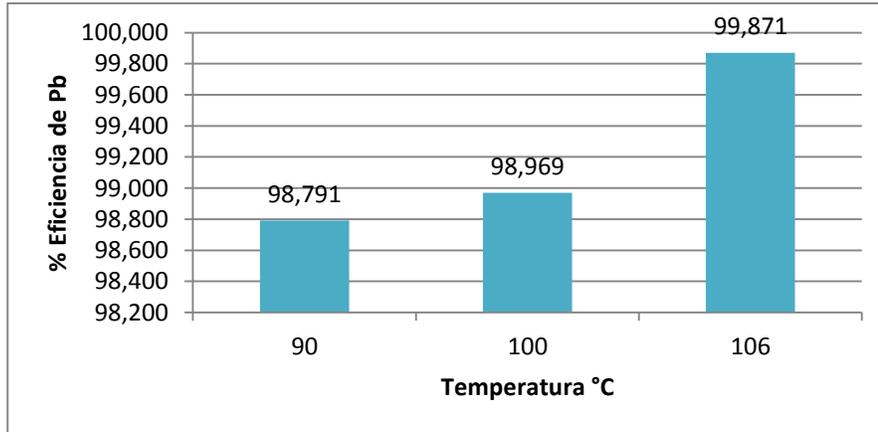
Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2. tablas XI a la XXII.

Figura 5. **Eficiencia de conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas**



Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2. tablas XI a la XXII.

Figura 6. **Eficiencia de conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico en el mineral en función a diferentes temperaturas**



Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.2. tabla XI a la XXII.

4.3. **La velocidad de reacción química y el orden de reacción respecto a la conversión del sulfuro de plomo y sulfuro de zinc**

En las tablas LXII a la LXIII se muestra la velocidad de reacción química y el orden de reacción respecto a la conversión del sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.

Tabla LXII. **Constante de velocidad de reacción de la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico en un mineral**

Constante de velocidad de reacción	Valor
K_1	$0,689 \text{ (dm}^3/\text{mol)}^{2.2} \cdot \text{min}^{-1}$
K_2	$0,112 \text{ (dm}^3/\text{mol)}^{0.4} \cdot \text{min}^{-1}$

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, ecuaciones 7 y 8, tablas XXIV a la XXVIII.

Tabla LXIII. **Orden de reacción de la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico en un mineral**

Orden de reacción	Valor
α_1	3,146
α_2	1,289
β_1	0,069
β_2	0,127

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.6.3, ecuaciones 7 y 8, tablas XXIV a la XXVIII.

4.4. Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales que se forman en el extracto mediante el filtrado en caliente

A continuación se explicará el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en forma de cristales que se forman en el extracto mediante el filtrado en caliente.

Tabla LXIV. **Porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en cristales**

Tiempo	Cristales de PbCl ₂ obtenidos	Cristales de PbCl ₂ esperados	Porcentaje de recuperación
300	0,65762	3,4428	19,10 %

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 3.7, ecuaciones 7 y 8, tablas XXVII, XXIX y XXX.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para determinar la concentración de sulfuro de zinc (esfalerita) y sulfuro de plomo (galena) en el mineral, el mineral fue triturado y molido pasándolo a una malla 80 para lograr una buena eficiencia en la digestión.

Se observa en tabla LVIII sección 4.1, la concentración total del zinc es de 24,18 % y plomo es de 10,41 %, se determina por medio de la digestión con ácido clorhídrico que muestra los elementos que se encuentran como carbonatos, sulfuros y óxidos. En la tabla LIX sección 4.1, la concentración como carbonato de zinc es de 6,47 % y de plomo es de 6,99 %, se determina por medio de la digestión con ácido sulfúrico que muestra los elementos que se encuentran como carbonato y óxidos. En la tabla LX sección 4.1 la concentración como sulfuro de zinc es de 26,40 % y sulfuro de plomo es de 3,95 %, para determinar la concentración de sulfuro en la solución es la diferencia de los resultados entre ambas digestiones de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.

En las figuras 5 y 6 se observa las temperaturas 90, 100 y 106 °C, se determinó la concentración de eficiencia de zinc de 72,687 % y de plomo 98,79 % a una temperatura de 90 °C y la concentración de eficiencia de zinc es de 92,219 % y para el plomo es de 99,87 % a una temperatura de 106 °C. En la figura se observa que la concentración de la eficiencia para la conversión de sulfuro de plomo no varió entre ambas temperaturas. Esto muestra que el plomo es más reactivo que el zinc ya que el porcentaje de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico aumentó en función de la temperatura. Tomando como base estos resultados la concentración de

eficiencia de zinc y plomo se obtuvo a una temperatura máxima de 106 °C. La concentración de cloruro de zinc en el extracto es de 12,27 % como ZnCl₂ y el porcentaje de cloruro de plomo en los cristales es de 89,63 % de PbCl₂.

En las tablas LX y LXI, la constante de velocidad de reacción es $k_1=0,689$ (dm³/mol) 2,2*min⁻¹ y $k_2=0,112$ (dm³/mol) 0,4*min⁻¹; el orden de reacción $\alpha_1 = 3,146$, $\alpha_2 = 1,289$, $\beta_1 = 0,069$ y $\beta_2 = 0,127$ y orden de reacción global es $n=3,209$. Se determinó la cinética química de la reacción y el orden de reacción por medio de una reacción múltiple en paralelo, donde se aplica un modelo matemático utilizando los datos experimentales a temperatura de reacción de 106 °C. Por medio del programa Polymath se aplica el método de Newton de ecuaciones no lineal es tomando como valor inicial 1, las ecuaciones que se introdujeron en el programa se pueden observar en la tabla XXVIII, los datos experimentales que se utilizaron en la matriz de ecuaciones no lineales es la concentración de cloruro férrico, sulfuro de zinc y sulfuro de plomo. Se obtuvo máxima 150 iteraciones para que convergiera teniendo el programa una tolerancia de 0,0000001. Las condiciones trabajadas fueron a una temperatura de 106 °C durante 5 horas de reacción, deteniendo a cada 15, 30, 60,120, 180, 240 y 300 minutos.

En la tabla LXIV se observa el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en cristales 19,10 % a una temperatura de 106 °C durante 5 horas de reacción. El porcentaje de recuperación se determinó por medio de filtrado en caliente utilizando una temperatura de separación de 80 °C, se procedió a agregar floculante para separar la solución de los insolubles y el líquido sobrenadante se filtró a temperatura de 80 °C. Se observa que el porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en cristales fue poco debido que la reacción no floculó bien.

En la tabla LIII, se utilizó la prueba de Fisher para la concentración de conversión de sulfuro de zinc a cloruro de zinc al cambiar la temperatura, dando como resultado que las varianzas difieren significativamente, porque la F calculada es mayor que F crítica, con base en este resultado se toma un criterio para la prueba de t-student para muestras suponiendo varianzas desiguales. En la tabla LV se observa que el valor absoluto de t calculado es mayor que t crítico (una cola), es decir que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

En la tabla LIV, se utilizó la prueba de Fisher para la concentración de conversión de sulfuro de plomo a cloruro de plomo al cambiar la temperatura, dando como resultado que las varianzas difieren significativamente, porque la F calculada es mayor que F crítica, con base en este resultado se toma un criterio para la prueba de t-student para muestras suponiendo varianzas desiguales. En la tabla LVI se observa que el valor absoluto de t calculado es menor que t crítico (una cola), es decir que se acepta la hipótesis nula.

6. LOGROS OBTENIDOS

- Se calculó el porcentaje de elementos del mineral que se utilizó para llevar a cabo el método de lixiviación por agitación (sólido-líquido) utilizando como reactante cloruro férrico a diferentes temperaturas, para obtener el cloruro de plomo y cloruro de zinc a nivel laboratorio, previo a la investigación, para trasladar la evaluación en el proceso de producción para la empresa Representaciones Químicas, S. A.
- Obtención de la constante de velocidad de reacción y orden de reacción por el cual se adaptó un modelo matemático con los datos experimentales, variando el tiempo y la temperatura para evaluación del mineral que contiene sulfuro de plomo (galena) y sulfuro de zinc (blenda o esfalerita).

CONCLUSIONES

1. La concentración de sulfuro de zinc (esfalerita) es de 26,40 % y para sulfuro de plomo (galena) es de 3,95 % que contiene el mineral.
2. El porcentaje de eficiencia de conversión de sulfuro de zinc con cloruro férrico es de 92,219 %, a una temperatura de 106 °C que se observa en la figura 5.
3. El porcentaje de eficiencia de conversión de sulfuro de plomo con cloruro férrico es de 99,87 %, a una temperatura de 106 °C que se observa en la figura 6.
4. La constante de velocidad de reacción para la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico se adaptó un modelo matemático, obteniendo la, $k_1 = 0,689 \left(\frac{dm^3}{mol}\right)^{2,2} \times min^{-1}$ y $k_2 = 0,112 \left(\frac{dm^3}{mol}\right)^{0,4} \times min^{-1}$.
5. El orden de reacción para la conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc con cloruro férrico, se adaptó un modelo matemático obteniendo la $\alpha_1 = 3,146, \alpha_2 = 1,289, \beta_1 = 0,069$ y $\beta_2 = 0,127$ y el orden de reacción global que es $n=3,209$.
6. El porcentaje de recuperación de cloruro de plomo en cristales es de 19,10 % a una temperatura de 106 °C.

7. Al aumentar la temperatura si existe variación en el porcentaje de conversión de sulfuro de zinc a cloruro de zinc, por lo que se acepta la hipótesis alterna y las dos medias muestrales difieren significativamente.

8. Al aumentar la temperatura no existe variación de conversión de sulfuro de plomo a cloruro de plomo, por lo que se acepta la hipótesis nula y las dos medias muestrales son iguales.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar un mineral con alto porcentaje de sulfuro de zinc y sulfuro de plomo y que no detecte carbonatos, para determinar la eficiencia de conversión de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.
2. Evaluar la cinética de reacción utilizando sulfuro de zinc grado reactivo por medio de lixiviación por agitación, utilizando como reactante cloruro férrico.
3. Evaluar la cinética de reacción utilizando sulfuro de plomo grado reactivo por medio de lixiviación por agitación, utilizando como reactante cloruro férrico.
4. Experimentar la cinética de reacción de un mineral que contenga sulfuro de plomo en ácido clorhídrico.

BIBLIOGRAFÍA

1. REGHEZZA I. A. *Físico-química de la hidrometalurgia*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Colombia: Universidad de Concepción, 1987. 380 p.
2. ALLEN. L. *Webster Estadística aplicada a los negocios y la economía*. 3a ed. USA: Pearson, 2008. 270 p.
3. BROWN, R. D. *Introduction to chemical analysis*. USA: McGraw-Hill, 1982. 150 p.
4. FOGLER. H. SCOTT *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 4a ed. Traducido del inglés por Roberto Luis Escalona García. USA: Pearson, 2010. 80 p.
5. VEGA AVILA, Elisa. *La teoría y la practica en el laboratorio de química Analítica I*. España: Universidad Autónoma Metropolitana. 2005. 95 p.
6. PERRY, Robert. GREEN, Don W. *Manual del ingeniero químico*. 7a ed. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España. 2001. 700 p. 4 vols.

APÉNDICES

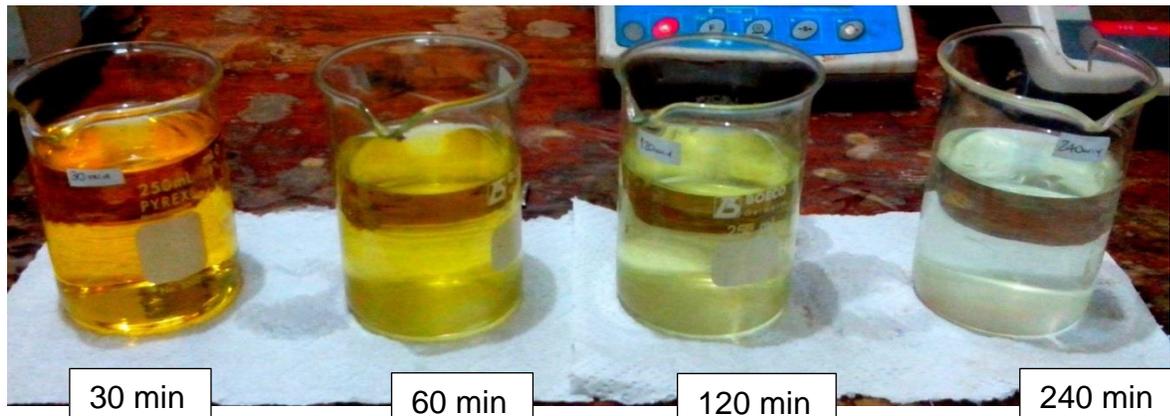
Apéndice 1. Equipo de lixiviación por agitación

Ilustración 1. Método de lixiviación por agitación (sólido-líquido)



Fuente: Laboratorio de "Representaciones Químicas, S. A."

Ilustración 2. Método de análisis al extracto diluido para determinar el porcentaje de plomo



Fuente: Laboratorio de “Representaciones Químicas, S. A.”

Apéndice 2. Muestra de cálculo

1. Porcentaje de los elementos que contiene el mineral y el extracto obtenido en los diferentes tiempos y temperatura

El porcentaje de los elementos se determinó por medio de métodos volumétricos tomando como referencia la masa inicial del mineral y cloruro férrico en donde se calcula el Zn, Mg, Ca, Fe+2, Fe+3, Al y Pb. Para saber el contenido en el mineral y extracto, tomando en cuenta la siguiente ecuación:

Para el contenido de magnesio:

$$\% \text{ Mg} = \frac{2,431 \cdot (V_{\text{Mg}}) \cdot C_{\text{EDTA}}}{\text{pm}}$$

Para el contenido de zinc:

$$\% \text{ Zn} = \frac{6,537 * V_{\text{Zn}} * C_{\text{EDTA}}}{\text{pm}}$$

Donde:

%Zn = concentración de zinc

%Mg = concentración de magnesio

V_{Mg} = volumen de la titulación de EDTA para magnesio

V_{ZN} = volumen de la titulación de EDTA para zinc

C_{EDTA} = concentración de EDTA 0,1 M

Ejemplo 1

Utilizando los datos de la tabla IV que está en la sección de recopilación y ordenamiento de la información se calculará la concentración de zinc y magnesio. Para la primera corrida

Para el contenido de magnesio:

$$\% \text{ Mg} = \frac{2,4305 * (0.1\text{ml}) * 0,097\text{M}}{0,1254\text{g}} = 0,189 \%$$

Para el contenido de Zinc:

$$\% \text{ Zn} = \frac{6,547 * 4,65\text{ml} * 0,09927}{0,1254} = 24,10 \%$$

Nota: este ejemplo se calcula la concentración de zinc y magnesio para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

Para el contenido de calcio:

$$\% \text{ Ca} = \frac{(4,008 * V_{\text{Ca}} * C_{\text{EDTA}})}{\text{pm}}$$

Donde:

%Ca = porcentaje de calcio

V_{Ca} = ml de EDTA utilizados en la titulación para calcio.

C_{EDTA} = concentración del EDTA 0,1 M

Ejemplo 2

Utilizando los datos de la tabla IV que está en la sección de recopilación y ordenamiento de la información se calculará la concentración de calcio para la primera corrida

$$\% \text{ Ca} = \frac{(4,008 * 0,25 \text{ ml} * 0,09918 \text{ M})}{0,1256 \text{ g}} = 0,791 \%$$

Nota: este ejemplo se calcula la concentración de calcio para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

Para el contenido de aluminio:

$$\% \text{ Al} = \frac{269,7 * ((V_{\text{EDTA}} - V_{\text{Zn}} - V_{\text{Fe}+3}) * M_{\text{EDTA}}) - (V_{\text{Znso4}} * M_{\text{Znso4}})}{\text{p.m.}}$$

Donde:

%Al = porcentaje de aluminio.

V_{EDTA} = volumen de EDTA

V_{ZnSO_4} = volumen de sulfato de zinc.

C_{EDTA} = concentración del EDTA 0,1 M

C_{ZnSO_4} = concentración del sulfato de zinc 0,1 M

Ejemplo 3

Utilizando los datos de las tablas VII y VIII que está en la sección de recopilación y ordenamiento de la información se calculará la concentración de aluminio para la primera corrida

Para el contenido de aluminio:

$$\% Al = \frac{2,698 * (10ml - 1,25ml - 0,05ml) * 0,106 - (7,47ml * 0,09998M)}{0,1256} = 0,97 \%$$

Nota: este ejemplo se calcula la concentración de aluminio para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

Para el contenido de hierro férrico:

$$\% Fe^{+3} = \frac{5,585 \times C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{m}$$

Donde:

$V_{Fe^{+3}}$ = volumen de EDTA utilizados en la titulación

C_{EDTA} = concentración del EDTA 0,1 M

m = peso de la muestra

Ejemplo 4

Utilizando los datos de la tabla VII que está en la sección de recopilación y ordenamiento de la información se calculará la concentración de aluminio para la primera corrida

$$\%Fe^{+3} = \frac{5,585 \times 0,106 \times 0,05\%}{0,1256} = 0,236\%$$

Nota: este ejemplo se calcula la concentración de hierro férrico para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

Para el contenido de hierro ferroso:

$$\%Fe^{+2} = \frac{5,585 \times C_{Dicromato} \times V_{dicromato}}{m}$$

Donde:

Vol = ml de dicromato de potasio utilizados en la titulación

m = peso de la muestra

Ejemplo No. 5

Utilizando los datos de la tabla IX que está en la sección de recopilación y ordenamiento de la información, se calculará la concentración de hierro ferroso para la primera corrida

$$\%Fe^{+2} = \frac{5,585 \times 0,1003M \times 0,80ml}{0,1256 g} = 3,568 \%$$

Nota: este ejemplo se calcula la concentración de hierro ferroso para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

Para el contenido de plomo

$$\%Pb = \frac{20,719 \times C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{m}$$

Donde:

VI= ml de EDTA utilizados en la titulación

CEDTA= concentración del EDTA utilizados en la titulación

m= peso de la muestra

Ejemplo 6

Utilizando los datos de la tabla X que están en la sección de recopilación y ordenamiento de la información, se calculará la concentración de hierro ferroso para la primera corrida

$$\%Pb = \frac{20,719 \times 0,1014M \times 5,10ml}{1,0227 g} = 10,48\%$$

Nota: en este ejemplo se calcula la concentración de plomo para las demás tablas que se encuentran en la recopilación y ordenamiento de la información y los resultados.

2. Concentración de cloruro férrico no reaccionado para determinar la velocidad de reacción en el extracto

Método numérico

La fórmula de diferenciación numérica se empleó por que los datos en las variables independientes están espaciados de manera uniforme.

Tiempo (min)	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
Concentración (mol/dm ³)	C_{A0}	C_{A1}	C_{A2}	C_{A3}	C_{A4}	C_{A5}

La fórmula de diferenciación de tres puntos

Punto inicial;
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{-3C_{A0} + 4C_{A1} - C_{A2}}{2\Delta t}$$

Punto intermedio
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{1}{2\Delta t} [(C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)})]$$

Último punto
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{1}{2\Delta t} [C_{A3} - 4C_{A4} + 3C_{A5}]$$

Ejemplo 7

Utilizando los datos de la tabla XLIX que están en la sección de tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, se calculará la velocidad de reacción en función de la concentración de cloruro férrico, tomando los datos del tiempo de reacción de 60 min.

$$r_B = \left(\frac{dC_A}{dt} \right)_{t_{60min}} = \frac{0,246 - 0,823}{2(120 - 30)} = -0,00320 \text{ mol/dm}^3 * \text{min}$$

$$-r_B * 100 = - \left(-0,00320 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} * \text{min} \right) * 100 = 0,32 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} * \text{min}$$

Nota: este ejemplo se calcula para las demás velocidades de reacción que se encuentran en la tabla XLIX.

3. Insumos de mineral y cloruro férrico utilizado en la solución

Reacciones utilizadas para determinar los insumos que se le agregan a la lixiviación.



Se determinó los gramos de sulfuro de plomo y sulfuro de zinc tomando una muestra de 75 gramos de mineral.

$$\mathbf{ZnS(g) = Mineral(g) * ZnS \%}$$

$$\mathbf{PbS(g) = Mineral(g) * PbS \%}$$

Se determinó los gramos estequiométrico de cloruro férrico en solución al 37,54 % que consume para sulfuro de plomo y sulfuro de zinc.

$$\mathbf{FeCl_3(g) = \frac{ZnS(g)}{PM_{ZnS}} * \frac{2 * PM_{FeCl_3}}{0.3754} + \frac{PbS(g)}{PM_{PbS}} * \frac{2 * PM_{FeCl_3}}{0.3754}}$$

Apéndice 3. Tabla de requisitos académicos

ÁREA DE QUÍMICA

- **QUÍMICA 3 Y 4:** Conceptos básicos, propiedades químicas y físicas de la materia
- **ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO:** propiedades extensivas e intensivas.
- **QUÍMICA ORGÁNICA 1 Y 2:** reacciones de oxidación y grupos funcionales

ÁREA DE FISICOQUÍMICA

- **FISICOQUÍMICA 1 Y 2:** propiedades fisicoquímicas
- **LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 1 Y 2:** comportamientos de presión y temperatura
- **TERMODINÁMICA 3 Y 4:** propiedades termodinámicas.
- **CINÉTICA DE LAS REACCIONES:** propiedades de la cinética química

ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS

- **FLUJO DE FLUIDOS (IQ2):** flujo de fluidos y diámetro nominal
- **TRANSFERENCIA DE CALOR (IQ3):** sellado por Inducción de Calor
- **TRANSFERENCIA DE MASA (IQ4):** transferencia de masa

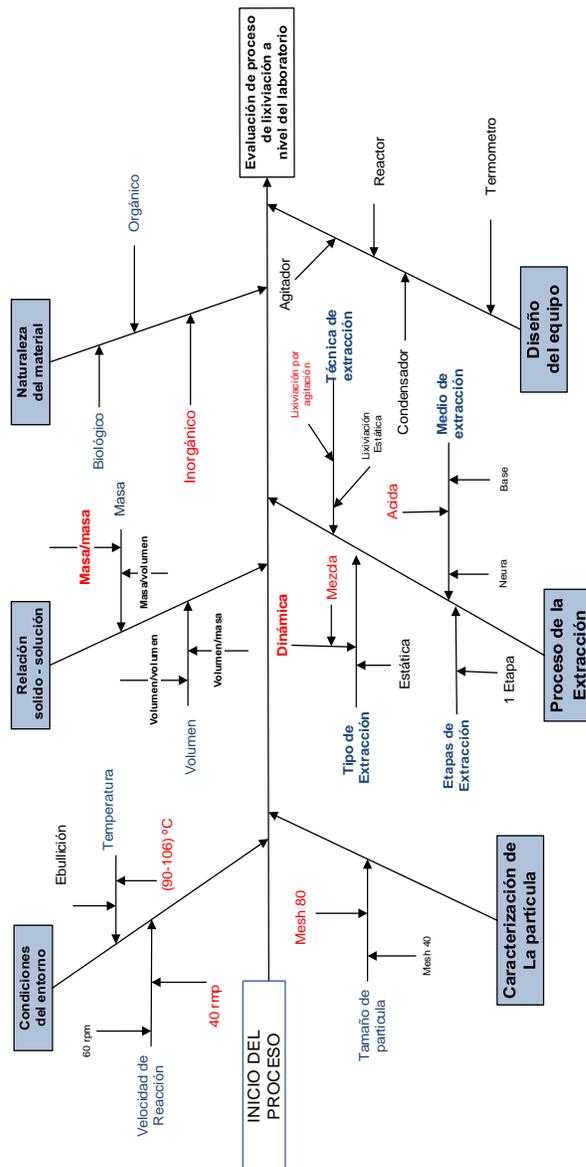
OTRA ÁREA

- **INGENIERÍA ECONÓMICA 3:** Análisis económico
- **EXTRACCIONES INDUSTRIALES:** propiedades fisicoquímicas y métodos de análisis.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Diagrama de Ishikawa

Figura 1. Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en el proceso de lixiviación por agitación



Fuente: elaboración propia.