



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ESCUELA SUPERIOR DE ZIMAPÁN

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN PROCESAMIENTO DE
RECURSOS MINERALES**

TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO VOLUMÉTRICO
PARA LA DETERMINACIÓN DE PLOMO EN
CONCENTRADO MINERAL DE LA PLANTA SANTA MARÍA**

Para obtener el título de
Licenciado en Ingeniería en Procesamiento de
Recursos Minerales

PRESENTA

Antonio Ortiz Guzman

Director (a)
Dr. Víctor Hugo Flores Sánchez

Codirector (a)
Dr. Rodolfo Rogelio Posadas Domínguez

Asesores
Ing. José Luis Villanueva Mejía

Zimapan de Zavala, Hgo., México, noviembre 2025



Mtra. Ojuky del Rocio Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

PRESENTE

Por este medio nos permitimos comunicarle que después de haber realizado la revisión del trabajo de tesis desarrollado por el pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Procesamiento de Recursos Minerales **ANTONIO ORTIZ GUZMAN** con número de cuenta 420263 los miembros del jurado han manifestado a la dirección de esta escuela que su trabajo cumple con los requisitos establecidos por la normativa universitaria para ser presentado en examen profesional correspondiente, por lo que se autoriza la impresión de su tesis titulada: **"OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO VOLUMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE PLOMO EN CONCENTRADO MINERAL DE LA PLANTA SANTA MARÍA"**.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

Dr. Víctor Hugo Flores Sánchez
PRESIDENTE

Dra. Leydi Diana Morales Díaz
SECRETARIO

Dr. Rodolfo Rogelio Posadas
Domínguez
VOCAL

Ing. Narayana Cantera Velázquez
SUPLENTE

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Zimapán de Zavala, Hidalgo a 25 de noviembre de 2025

Dr. César Amador Ambriz
Director

Av. Jorge Preisser Terán s/n Col. Nueva Reforma,
Zimapán, Hidalgo; C.P. 42330
Teléfono: 771 717 20 00 Ext. 50701
eszi@uah.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

A **dios** por darme la fortaleza, la sabiduría y la paz necesaria para llegar hasta aquí. Este logro es un reflejo de su gracia infinita.

A mis padres **Antonio** y **Roselia** , gracias por creer en mi cuando nadie más lo hizo, por darme fuerzas cuando estaba débil y por sostenerme cuando me caía, siempre he sido afortunado de tenerlos a mi lado, por el inmenso amor que siento por ustedes, gracias por entregarme los mejores años de sus vidas y por darme el mejor regalo de todo el don de la vida, el cual hoy he logrado culminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pude recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecido.

A mis hermanos **Eduardo** y **Jetsibe**, eternos cómplices de risas y peleas, desde muy pequeños estamos tan unidos y les doy gracias por su inmenso amor y apoyo.

Al **Dr. Víctor Hugo Flores Sánchez** y **Dr. Rodolfo Rogelio Posadas Domínguez**, por depositar su confianza y apoyo, para culminar mis estudios profesionales.

Al **Ing. José Luis Villanueva Mejía**, por depositar su confianza y apoyo para la realización de este trabajo para culminar mis estudios profesionales.

Al **Ing. Fernando Santiago Bautista** y al **Ing. Jonatán Espinoza Bautista**, agradecido por compartirme el conocimiento, su confianza y apoyo.

A los colaboradores del área de laboratorio, en especial a **Fredy Avendaño** por su apoyo y respaldo para la experimentación.

Al **Lic. Julio Cesar Sánchez González**, por brindarme el espacio y herramientas para la realización de este trabajo.





A la empresa **GRUPO SANSILVEX S DE RL DE CV**, gracias por depositar su confianza y su apoyo para la realización de este trabajo.

A la **Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo** y a la **Escuela Superior de Zimapán** por formarme y prepararme para afrontar cualquier reto en la vida y profesional, por compartirme su conocimiento y educación.

A mis **docentes** que fueron los principales de encaminarme, prepararme, capacitarme y con sus enseñanzas adquiridas en mi formación profesional.

A mis **amigos** y **amigas** de la IPRM, quienes convivimos, estudiamos y estuvieron durante el proceso de formación, les deseo éxito en cada una de sus metas propuestas.





*“Esfuércese por la perfección en todo lo que
haga. Tome lo mejor que exista y hágalo
mejor. Cuando no exista, diseñelo.”*

Sir Henry Royce





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

“Optimización del Método Volumétrico para la Determinación de Plomo en Concentrado Mineral de la Planta Santa María”





ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	- X -
ÍNDICE DE TABLAS.....	- XI -
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	- XI -
RESUMEN.....	- 1 -
CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN.....	- 2 -
CAPITULO 2 - SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	- 4 -
2.1 ANTECEDENTES.....	- 4 -
2.1.1 Minería en el mundo.....	- 4 -
2.1.2 Minería.....	- 4 -
2.1.3 Química en la industria minera.....	- 4 -
2.1.4 Química analítica en la industria minera.....	- 4 -
2.1.5 Historia breve de la química analítica.....	- 5 -
2.1.6 La química analítica contemporánea.....	- 5 -
2.1.7 Volumetría.....	- 6 -
2.1.8 Pb.....	- 6 -
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	- 9 -
2.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	- 10 -
2.3.1 Objetivo General.....	- 10 -
2.3.2 Objetivos Específicos.....	- 10 -
2.4 HIPÓTESIS.....	- 11 -
CAPITULO 3 - MARCO TEÓRICO.....	- 12 -
3.1 GENERALIDADES.....	- 12 -
3.1.1 La minería.....	- 12 -
3.2 Yacimiento mineral.....	- 13 -





3.3 Mina.....	- 13 -
3.4 Mina superficial.....	- 14 -
3.5 Mina subterránea.....	- 15 -
3.6 Minerales metálicos.....	- 16 -
3.7 Minerales no metálicos.....	- 17 -
3.8 Relevancia de la minería en nuestras vidas.....	- 17 -
3.9 Importancia de la minería en México.....	- 18 -
3.10 Cuanto aporta la minería en México.....	- 18 -
3.11 Principales metales extraídos en México.....	- 18 -
3.12 Principales metales extraídos en Zimapán, Hidalgo.....	- 18 -
3.13 Metalurgia.....	- 19 -
3.13.1 Clasificación de la metalurgia.....	- 19 -
3.14 Planta de beneficio.....	- 20 -
3.15 Flotación.....	- 21 -
3.15.1 Etapas de la flotación.....	- 21 -
3.15.2 Función de la flotación.....	- 22 -
3.16 Reactivos.....	- 22 -
3.16.1 Clasificación de los reactivos.....	- 23 -
3.17 Jales.....	- 23 -
3.18 Presa de jales.....	- 24 -
3.19 Laboratorio metalúrgico.....	- 24 -
3.20 La química.....	- 25 -
3.21 Bioquímica.....	- 25 -
3.22 Química física (termodinámica).....	- 25 -
3.23 Química orgánica.....	- 26 -





3.24 Química inorgánica.....	- 26 -
3.25 Química analítica.....	- 26 -
3.25.1 Química analítica cuantitativa.....	- 27 -
3.25.2 Química analítica cualitativa.....	- 27 -
3.26 Métodos cualitativos.....	- 27 -
3.27 Métodos de digestión ácida.....	- 28 -
3.28 Métodos cuantitativos.....	- 29 -
3.28.1 Métodos analíticos cuantitativos.....	- 29 -
3.28.1.1 Métodos instrumentales	- 29 -
3.28.1.2 Métodos gravimétricos	- 30 -
3.28.1.3 Métodos volumétricos	- 30 -
3.28.1.4 Tipos de volumetrías según su reacción química.....	- 31 -
3.29 Pasos para un análisis cuantitativo típico.....	- 31 -
3.30 Estándares primarios.....	- 33 -
3.30.1 Material de referencia certificada (MRC).....	- 33 -
3.31 Estándares secundarios.....	- 33 -
3.32 Fuentes de error en el análisis químico.....	- 34 -
3.33 La media aritmética.....	- 34 -
3.34 Precisión.....	- 34 -
3.35 Exactitud.....	- 35 -
3.36 NMX-EC-17025-IMNC-2000. Métodos de ensayo y calibración y validación del método.....	-36 -
3.37 Validación del método.....	- 37 -
3.38 Importancia del análisis químico.....	- 38 -
CAPITULO 4 – MARCO METODOLÓGICO.....	- 39 -





4.1 METODOLOGÍA.....	- 39 -
4.1.1 Enfoque de la investigación.....	- 39 -
4.1.2 Alcance de la investigación.....	- 39 -
4.1.3 Diseño de la investigación.....	- 39 -
4.1.4 Recolección de muestras.....	- 40 -
4.1.5 Universo y muestra.....	- 40 -
4.1.5.1 Universo de estudio.....	- 40 -
4.1.5.2 Equipos y materiales utilizados para el muestreo y cuarteo.....	- 40 -
4.1.5.3 Tipo de muestreo.....	- 41 -
4.1.5.4 Técnica de cuarteo.....	- 42 -
4.1.6 Preparación del concentrado.....	- 43 -
4.1.7 Determinación de plomo (Pb).....	- 45 -
4.1.7.1 Principio del método.....	- 45 -
4.1.7.2 Población y muestra.....	- 45 -
4.1.7.3 Instrumentos y equipos.....	- 45 -
4.1.7.4 Materiales de laboratorio.....	- 46 -
4.1.7.5 Reactivos.....	- 46 -
4.1.7.6 Preparación de reactivos.....	- 46 -
4.1.7.7 Procedimiento de análisis.....	- 47 -
CAPITULO 5 - CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	- 51 -
5.1 Cálculo para la determinación de humedad.....	- 51 -
5.2 Cálculos para la determinación de plomo (Pb) %.....	- 52 -
5.3 Cálculo para la media aritmética los resultados de los %Pb.....	- 54 -
5.4 Exactitud en % en referencia a nuestro material de referencia certificado.....	- 56 -
5.5 Error porcentual relativo (ER%).....	- 58 -





5.6 Error absoluto.....	- 59 -
5.7 Validación del método.....	- 62 -
5.8 Errores comunes durante la descomposición de muestras.....	- 63 -
CAPITULO 6 – CONCLUSIONES.....	- 64 -
CAPITULO 7 – RECOMENDACIONES.....	- 65 -
8. REFERENCIAS.....	- 66 -





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Química Analítica Contemporánea.....	- 5 -
Figura 2 Concentrado de Pb.....	- 7 -
Figura 3 Algunas aplicaciones del Plomo en diversas industrias.....	- 8 -
Figura 4 Obra minera "frente"	- 12 -
Figura 5 Yacimiento mineral.....	- 13 -
Figura 6 Cantera de mármol.....	- 14 -
Figura 7 Minería subterránea.....	- 15 -
Figura 8 Mineral: Sulfuro de Pb (galena).....	- 16 -
Figura 9 Carbonato de calcio (mármol).....	- 17 -
Figura 10 Concentrados metálicos Pb, Cu y Zn.....	- 19 -
Figura 11 Planta de Beneficio "Santa María"	- 20 -
Figura 12 Celdas de flotación Denver.....	- 21 -
Figura 13 Reactivo Sulfato de Cu.....	- 22 -
Figura 14 Muestra representativa de Jales.....	- 23 -
Figura 15 Presa de jales.....	- 24 -
Figura 16 Química.....	- 25 -
Figura 17 Análisis cuantitativo con método instrumental.....	- 26 -
Figura 18 Digestión ácida para análisis cuantitativo.....	- 28 -
Figura 19 Equipo de Absorción Atómica (EAA).....	- 30 -
Figura 20 Técnicas analíticas.....	- 38 -
Figura 21 Incrementos realizados sobre la góndola.....	- 41 -
Figura 22 Representación gráfica de la técnica de cuarteo empleada para este trabajo de investigación.....	- 42 -
Figura 23 Muestra representativa de Pb.....	- 43 -
Figura 24 Horno de secado redLINE.....	- 44 -
Figura 25 Digestión ácida con perclórico.....	- 47 -
Figura 26 Filtrado de la muestra atacada.....	- 48 -
Figura 27 Vaso precipitado con el papel filtro troceado.....	- 49 -
Figura 28 Agregado del indicador Xilenol Orange.....	- 49 -
Figura 29 Solución cambió de un color grosella a amarillo.....	- 50 -





Figura 30 Titulación se realizó en caliente.....	- 50 -
Figura 31 Cargado de concentrado.....	- 52 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Determinación de humedad.....	- 51 -
Tabla 2 Resultados de la Determinación de Plomo.....	- 53 -
Tabla 3 Resultados Promediados (media).....	- 55 -
Tabla 4 Exactitud de los resultados.....	- 57 -
Tabla 5 Error relativo porcentual.....	- 59 -
Tabla 6 Error absoluto.....	- 60 -
Tabla 7 Parámetros estadísticos.....	- 61 -

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Punto de equivalencia en una titulación.....	- 30 -
(2) Ley de equivalentes químicos.....	- 31 -
(3) Media aritmética.....	- 34 -
(4) Desviación estándar.....	- 34 -
(5) Varianza.....	- 35 -
(6) Coeficiente de variación (CV%).....	- 35 -
(7) Exactitud (%).....	- 35 -
(8) Error absoluto.....	- 36 -
(9) Error relativo porcentual (ER%).....	- 36 -
(10) Determinación de humedad.....	- 51 -
(11) Determinación porcentaje de plomo (Pb).....	- 52 -





RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo optimizar el método volumétrico empleado en la determinación de plomo (Pb) en concentrado mineral de la Planta de Santa María, mediante la implementación de una nueva técnica de digestión ácida combinando ácido perclórico y ácido sulfúrico, la investigación se realizó en colaboración con el Grupo Sansilvex S. de R.L. de C.V., empresa minera ubicada en Zimapán, Hidalgo, dedicada a la extracción, beneficio y comercialización de concentrado de Zn, Pb y Cu.

El estudio se desarrolló con método no normalizado, bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental y alcance explicativo, donde se analizaron parámetros de precisión, exactitud y variabilidad. El procedimiento consistió en recolectar muestras mediante un muestreo sistemático en el concentrado de plomo, las cuales fueron sometidas a varios procesos, incluyendo al de digestión ácida, seguido de titulación de EDTA utilizando el indicador Xilenol Orange; los resultados se compararon con los obtenidos mediante el método volumétrico tradicionalmente utilizado por la empresa y MRC.

Los resultados experimentales demostraron que la nueva técnica de digestión incrementó la exactitud y reproducibilidad de los análisis, alcanzando valores de concentración promedio de Pb del 38.52 % al 38.60 %, muy cercanos al valor del material de referencia certificada (38.90 %), con errores relativos menores al 1 %. Esto evidenció una mejora significativa en la confiabilidad del método, reduciendo las fuentes de error analítico derivadas de una digestión incompleta o interferencias químicas.

Se concluye que los resultados obtenidos en la validación demuestran que el método volumétrico propuesto para la determinación de plomo (Pb) en concentrados minerales, basado en digestión ácida con ácido perclórico y ácido sulfúrico, cumple con los criterios de desempeño establecidos por la NMX-EC-17025-IMNC-2000 para métodos no normalizados, siendo exacto, preciso, lineal, selectivo y robusto, por lo que puede ser aplicado de manera confiable en el control de calidad de concentrados minerales.

Palabras clave: Plomo, Volumetría, Digestión ácida, EDTA y Exactitud





CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Para comenzar, la minería constituye una de las principales actividades extractivas del ser humano, ya que permite obtener de la corteza terrestre diversos minerales que sirven como materia prima para la elaboración de materiales indispensables en el desarrollo tecnológico e industrial (Grupo ORS, 2023). Esta labor comprende un conjunto de fases que incluyen la prospección, exploración, explotación, beneficio del mineral y cierre de mina, las cuales requieren la participación de especialistas en áreas como geología, metalurgia y minería (Figuerola y Monreal, 2012).

En México, esta actividad se ha practicado durante más de quinientos años y ha sido determinante en los ámbitos económico, social, político y cultural. En el periodo colonial, la extracción de metales fue un factor que impulsó la creación y consolidación de ciudades como Guanajuato, Zacatecas, Pachuca y Chihuahua (Moreno et al., 2012). Actualmente, el estado de Hidalgo destaca por sus depósitos de oro, plata, plomo, zinc y cobre, cuya producción abastece tanto el mercado nacional como el extranjero (Hernández et al., 2009). Un ejemplo representativo es el distrito minero de Zimapán, donde se han explotado por más de un siglo yacimientos tipo skarn ricos en plomo, zinc, plata y cobre (Moreno et al., 2012).

La planta de beneficio “Santa María” realiza el procesamiento del mineral proveniente de la mina Monte, el cual se recibe en camiones y se registra en una báscula para llevar un control del tonelaje. Posteriormente, el material pasa por diferentes etapas de conminución: en la trituración primaria se reduce a fragmentos de entre 3 y 5 pulgadas, mientras que en la secundaria alcanza un tamaño cercano a $\frac{3}{4}$ de pulgada. Después, el mineral se muele hasta lograr una granulometría fina de -200 mallas y, finalmente, se somete al proceso de flotación, donde mediante reactivos específicos se concentran los metales de interés. Los residuos sin valor económico, denominados jales, se conducen hacia presas de disposición final.

Una vez obtenidos los concentrados de plomo, zinc y cobre, estos se almacenan en patios de concentrados en espera de su embarque. Antes de su envío, se realiza un muestreo





representativo y se aplican técnicas analíticas clásicas e instrumentales para verificar la calidad y pureza del producto final.

En este contexto, la química analítica resulta fundamental, ya que permite determinar la composición de las muestras tanto en términos cualitativos (identificación de las especies presentes) como cuantitativos (proporción relativa de cada una de ellas) (Skoog, 1996).

El presente trabajo tuvo como propósito cuantificar la concentración de plomo (Pb) en los concentrados minerales, utilizando un método volumétrico con parámetros modificados para una mejor optimización en el análisis de resultados y comparándolos con el método empleado tradicionalmente en esta empresa, con el fin de identificar posibles fuentes de error y disminuir la variación. La investigación se desarrolló en colaboración con el Grupo Sansilvex de R.L. de C.V., empresa dedicada a la explotación, beneficio y comercialización de concentrados minerales como Pb, Zn y Cu, que constituye una importante fuente de empleo en el municipio de Zimapán, Hidalgo.





CAPITULO 2 - SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Minería en el mundo

La minería genera importantes beneficios para la sociedad, aunque también implica impactos considerables. Uno de los principales problemas es que los minerales son recursos no renovables y, debido a la explotación intensiva, se consumen a un ritmo superior a la capacidad de recuperación del planeta. El Fondo Mundial para la Naturaleza señala que cada año se utiliza aproximadamente un 20% más de recursos naturales de lo que la Tierra puede reponer (Bautista, 2021, como se citó en Fondo Mundial para la Naturaleza, 2002).

2.1.2 Minería

Se entiende como el conjunto de actividades orientadas a localizar, extraer y transformar minerales para su aprovechamiento. Por obtenerse directamente de la naturaleza, se clasifica dentro del sector primario de la economía (INEGI, 2019).

2.1.3 Química en la industria minera

La minería no podría llevarse a cabo sin el apoyo de la química, ya que esta disciplina interviene desde la caracterización de las muestras recolectadas en exploración hasta la verificación de pureza de los concentrados obtenidos. Por esta razón, los laboratorios especializados y las empresas que proveen reactivos químicos se han convertido en un componente indispensable para el funcionamiento del sector minero (HLC SISTEMAS, 2020).

2.1.4 Química analítica en la industria minera

La química analítica aporta técnicas que permiten identificar y cuantificar los minerales presentes en un yacimiento, lo que posibilita planificar con mayor certeza y optimizar el aprovechamiento de los recursos. Tanto los métodos clásicos como los instrumentales más recientes son herramientas esenciales para garantizar la eficiencia y el éxito de los proyectos mineros (Manrique, 1961).





2.1.5 Historia breve de la química analítica

A finales del siglo XVIII, Antoine Lavoisier realizó estudios fundamentales sobre la composición del aire y de los minerales, contribuyendo a los cimientos de la química analítica. Posteriormente, en el siglo XIX, Carl Friedrich Mohr introdujo métodos para la determinación cualitativa de muestras, perfeccionó técnicas volumétricas y diseñó instrumentos de laboratorio como buretas y pipetas. Además, impulsó métodos cuantitativos como la gravimetría y la volumetría, lo que le valió el reconocimiento como uno de los fundadores de la química analítica moderna (González, 2021).

2.1.6 La química analítica contemporánea

En sus inicios, esta disciplina utilizaba técnicas de la llamada “química húmeda”, entre ellas la gravimetría y las titulaciones ácido-base, que permitieron establecer la composición elemental de las sustancias. Con el avance tecnológico se incorporaron métodos instrumentales, como la cromatografía, la espectroscopía y las técnicas electro-analíticas, que hoy constituyen herramientas indispensables para diversas ramas de la ciencia y la industria (Ciencia y Datos.org, 2024).



Figura 1 Química Analítica Contemporánea.

Fuente: Elaboración propia 2025.





2.1.7 Volumetría

La volumetría es un procedimiento analítico que facilita la identificación de la concentración de una muestra (analito) desconocida al añadir una solución de valoración con una concentración determinada. Los métodos de análisis volumétrico se fundamentan en la medición del volumen de un reactivo de concentración determinada por el consumo del analito. Esencialmente, los métodos comparten que son criterios fundamentados en diversos.

Tipos de reacción química:

- Formación de iones complejos
- Ácido-base
- Precipitación

En resumen, el método denominado volumetría, procedimiento cuantitativo que facilita la medición y determinación de volúmenes (Pérez Porto & Merino, 2022).

2.1.8 Pb

El plomo es un metal presente en la corteza terrestre, principalmente en minerales como galena, cerusita y anglesita. De manera natural puede liberarse al ambiente por fenómenos geológicos como la meteorización o la actividad volcánica; sin embargo, desde la antigüedad ha sido extraído y utilizado por el ser humano en grandes cantidades (United Nations Environment Programme, 2010).





El nombre proviene del latín plumbum y corresponde al símbolo químico “Pb”, con número atómico 82. Es un elemento de color gris azulado, blando, muy maleable y de elevada densidad. Una de sus propiedades más notables es la resistencia a la corrosión. Su punto de fusión se encuentra cerca de 327 °C y su ebullición alrededor de 1725 °C. Puede encontrarse en forma de isótopos estables o radiactivos y, en ocasiones, asociado al uranio (U) y al torio (Th). Debido a su toxicidad, la exposición prolongada a altas concentraciones de plomo puede generar daños en los sistemas renal, cardiovascular, hematológico y gastrointestinal (Ondarse, 2024; Real Academia Española, 2024).



Figura 2. Concentrado de Pb.

Fuente: Elaboración propia 2025.

En una investigación realizada por National Library of Medicine (2021) se señala que “El principal uso del plomo es en baterías de almacenamiento (por ejemplo, para los vehículos de motor, la energía solar y para el sistema de alimentación ininterrumpida). Asimismo, el plomo se utiliza mucho en las industrias de la construcción y la química. Se utiliza en las municiones, en los sistemas de blindaje contra las radiaciones ionizantes y en el revestimiento de tanques y tuberías. El plomo metálico es uno de los principales componentes de muchas aleaciones, como las utilizadas para las soldaduras, las aleaciones de metales, los aceros especiales, el latón y los bronce. También se puede utilizar como peso en los balastos y como contrapeso en las ruedas de los vehículos de motor.





Las sales inorgánicas de plomo se utilizan en pigmentos, pinturas, vidriados, vidrios, plásticos y compuestos de caucho. El plomo también se encuentra en algunos cosméticos y medicinas tradicionales”.



Figura 3 Algunas aplicaciones del Plomo en diversas industrias.
Fuente: Elaboración propia 2025.





2.2 JUSTIFICACIÓN

En la explotación de depósitos minerales naturales, es común encontrar diversas formaciones cristalinas que representan distintos tipos de minerales. Para aprovecharlos industrialmente, es necesario someterlos a un proceso de concentración.

La concentración de minerales consiste en una serie de procedimientos destinados a aumentar la pureza de los minerales extraídos de la corteza terrestre, hasta alcanzar un grado que cumpla con las exigencias de la industria. Esto permite su aplicación directa o su posterior refinamiento (Arellano, 2010).

En la planta de beneficio “Santa María”, se emplea una técnica tradicional de concentración basada en un circuito de flotación colectiva (Pb-Cu). Una vez obtenido el concentrado mixto, este pasa a las celdas de limpieza, donde se agregan reactivos específicos para realizar la flotación selectiva. En esta etapa, se flota el plomo (Pb) y se deprime el cobre (Cu), logrando su separación. Los concentrados separados se almacenan en sus respectivas pilas y posteriormente son enviados al patio de concentrados, donde son resguardados hasta su comercialización.

Los concentrados de plomo (Pb) poseen un alto valor económico e industrial, debido a su amplia gama de aplicaciones. El plomo metálico obtenido a partir de estos concentrados es un recurso esencial para la fabricación de baterías, equipos de protección contra radiaciones, componentes electrónicos, dispositivos médicos, entre otros productos de uso cotidiano. Por lo tanto, es fundamental que la determinación de su concentración se realice con exactitud y precisión, a fin de garantizar la calidad del producto y su comercialización.

En este contexto, se sugiere mejorar el método de análisis basado en la volumetría, con el objetivo de mejorar la precisión en la determinación del contenido de Pb. Esta elección se deriva de la identificación de variaciones significativas entre los resultados obtenidos mediante la técnica volumétrica tradicional. Al incrementar la precisión y exactitud del análisis, se busca optimizar la toma de decisiones técnicas y económicas en el proceso de venta del concentrado de plomo, que garantizara así una mayor eficiencia en la recuperación del recurso y en la rentabilidad de su comercialización.





2.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.3.1 Objetivo General

Optimizar el método volumétrico para la determinación de plomo en concentrado mineral, mediante la implementación de una técnica de digestión ácida con ácidos perclórico (HClO_4) y sulfúrico (H_2SO_4), a fin de mejorar la confiabilidad de los resultados y garantizar la calidad del producto final.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Implementar y evaluar las técnicas de digestión ácida utilizadas en la determinación de plomo, con nuevos ácidos.
- Comparar los resultados con el método volumétrico tradicionalmente empleado en la empresa.
- Analizar los parámetros de precisión, exactitud y variabilidad en los resultados del método volumétrico con el cambio de digestión ácida.
- Validar la optimización del método volumétrico mediante pruebas experimentales que permitan garantizar la confiabilidad de los análisis en los embarques de concentrado de plomo según la NMX-EC-17025-IMNC-2000 para métodos no normalizados.





2.4 HIPÓTESIS

Con respecto a la pregunta de investigación: La determinación del contenido de plomo en los concentrados minerales reviste una importancia fundamental en el ámbito de la ingeniería metalúrgica, ya que permite evaluar la calidad y eficiencia de los procesos de concentración aplicados en planta. El conocimiento preciso del porcentaje de plomo (Pb%) en el concentrado es esencial para establecer la ley del mineral, valorar económicamente el producto final y garantizar un control adecuado del proceso metalúrgico. Por otra parte, la determinación confiable de plomo asegura el cumplimiento de estándares ambientales y comerciales, evitando pérdidas económicas derivadas de errores analíticos o incumplimientos normativos.

Si se emplea el método volumétrico para la determinación de plomo mediante una técnica de digestión ácida que combine ácido perclórico (HClO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), se mejorará significativamente la precisión, exactitud y reproducibilidad de los resultados analíticos. Esta mejora contribuirá a una cuantificación más confiable del plomo, reduciendo la variabilidad de los resultados y garantizando la calidad del producto final.





CAPITULO 3- MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 La minería

En cuanto a la actividad minera primaria, se le conoce como tal, la cual consiste en la extracción de los minerales de la tierra y su beneficio. Asimismo, es una de las principales industrias en México. Genera una cantidad importante de empleos directos e indirectos y, por lo tanto, aporta significativamente al ingreso de la economía nacional (Figueroa & Monreal, 2012).

Esta actividad es realizada por los mineros, quienes son expertos en la extracción y tratamiento de estos materiales (Redacción, 2024).



Figura 4. Obra minera "frente".
Fuente: Elaboración propia 2025.



3.2 Yacimiento mineral

Por lo que se refiere a un yacimiento mineral, cuerpo de roca o zona donde se encuentra una concentración alta de minerales de interés económico, pero también se encuentra rodeada de roca estéril, estos yacimientos se encuentran distribuidos sobre la superficie terrestre (Figueroa & Monreal, 2012).



Figura 5 Yacimiento mineral.
Fuente: Elaboración propia 2025.

3.3 Mina

Respecto a una mina, es el lugar donde se encuentra un yacimiento mineral metálico o no metálico factible económicamente; se extrae y se procesa. De igual modo, existen diferentes tipos y métodos de explotación de minas de acuerdo con las características del yacimiento mineral (Figueroa & Monreal, 2012).



3.4 Mina superficial

Inicialmente, la mayoría de las minas a nivel mundial son de esta clase, puesto que alrededor del 60% de los minerales extraídos utilizan este sistema. Generalmente, la característica principal es que el mineral está ubicado muy cerca de la superficie. Además, la maquinaria utilizada en estas minas es de grandes dimensiones y capacidades. Este tipo de minas superficiales se conocen como minas a cielo abierto y canteras (Figueroa & Monreal, 2012).



Figura 6 Cantera de mármol.

Fuente: Elaboración propia 2025.



3.5 Mina subterránea

En cuanto a una mina subterránea, es aquella que se encuentra ubicada debajo de la superficie del suelo. La extracción del mineral se realiza de este modo cuando el método de minado a cielo abierto no es viable por razones económicas, sociales o ambientales. Por otro lado, el equipo que se utiliza en la minería subterránea es significativamente más pequeño que el de cielo abierto, ya que los túneles y otras estructuras son espacios más limitados (Figueroa & Monreal, 2012).



Figura 7. Minería subterránea.
Fuente: Elaboración propia 2025.

3.6 Minerales metálicos

Los minerales metálicos poseen características únicas, son conductores de calor, electricidad y tienen brillo propio. Los metales más frecuentes en México son el oro, plata, plomo, cobre, zinc y hierro. Además, en su forma natural suelen estar combinados, como el oro con el cobre o el plomo con el zinc. Para su separación, se utilizan diversos procesos mecánicos y químicos, realizados por los ingenieros metalurgistas, que logran extraer el metal de la mena (Figuroa & Monreal, 2012).

De acuerdo con Figuroa y Monreal (2012), los minerales se clasifican en:

- **Metales preciosos como:**(el oro, la plata, etc). Se utilizan como medio de inversión, en orfebrería y joyería.
- **Metales industriales no ferrosos como:**(el antimonio, arsénico, bismuto, estaño, aluminio, etc.).
- **Metales siderúrgicos como:**(los más importantes son el hierro y el manganeso; se utilizan como materia prima en la industria siderúrgica).



Figura 8. Mineral: Sulfuro de Pb (galena).

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.7 Minerales no metálicos

En el grupo de los minerales no metálicos o industriales se localizan principalmente los yacimientos de los materiales que se emplean cotidianamente en la sociedad, como: piedra para edificar casas y edificios, cemento, cal, sales, sulfuros, magnesita, yeso, talco, fluorita, grava y arenas, mármol, granito, entre otros (Figueroa & Monreal, 2012).



Figura 9.Carbonato de calcio (mármol).

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.8 Relevancia de la minería en nuestras vidas

En primer lugar, es innegable que los minerales y las rocas ofrecen la mayoría de los materiales y elementos químicos que empleamos actualmente, ya que se utilizan para construir viviendas, edificios, pinturas, aparatos electrónicos, coches, incluso pasta dental, y una multitud de artículos que no existirían sin nuestra madre tierra y la minería. No obstante, pocas personas conocen y comprenden la función de los minerales, cuando esto debería ser algo habitual, ya que, sin percatarnos, los productos e incluso la comida que consumimos incluyen minerales y compuestos químicos (Figueroa & Monreal, 2012).



3.9 Importancia de la minería en México

Desde un punto de vista económico, la minería representa un sector fundamental para la economía de México. Además, se destaca por ser uno de los principales productores de plata a nivel mundial, y cuenta con grandes reservas de otros metales como el oro, el cobre y el zinc (Redacción, 2024).

3.10 Cuanto aporta la minería en México

En 2021, la minería en México contribuyó con el 8.6% al Producto Interno Bruto (PIB) industrial y el 2.3% al PIB nacional (De Economía, 2024).

En ese año se ubicó en la posición número uno a nivel global en la producción de plata y en la sexta posición en la producción de oro. Sonora y Zacatecas se destacaron por su producción de estos dos minerales (Boletín Estadístico Y Geográfico, 2022).

3.11 Principales metales extraídos en México

En el caso de México, ha sido el principal productor de plata durante más de 13 años; además, se ubica entre los 10 primeros productores de 17 minerales. Segundo en fluorita, tercero en sulfato de sodio y wollastonita, cuarto en celestita, quinto en plomo, molibdeno, barita, diatomita y sulfato de magnesio, sexto en zinc, octavo en sal, yeso, cadmio, oro y feldespato, y décimo en cobre (De Economía, 2024).

3.12 Principales metales extraídos en Zimapán, Hidalgo

Acerca de los municipios más significativos en la minería de Hidalgo, destaca Zimapán, famoso por su extracción de plomo, zinc y cobre. Por ello, ha sido fundamental en la industria minera del estado, aportando de manera significativa al PIB nacional (Santillán & Santillán, 2024).



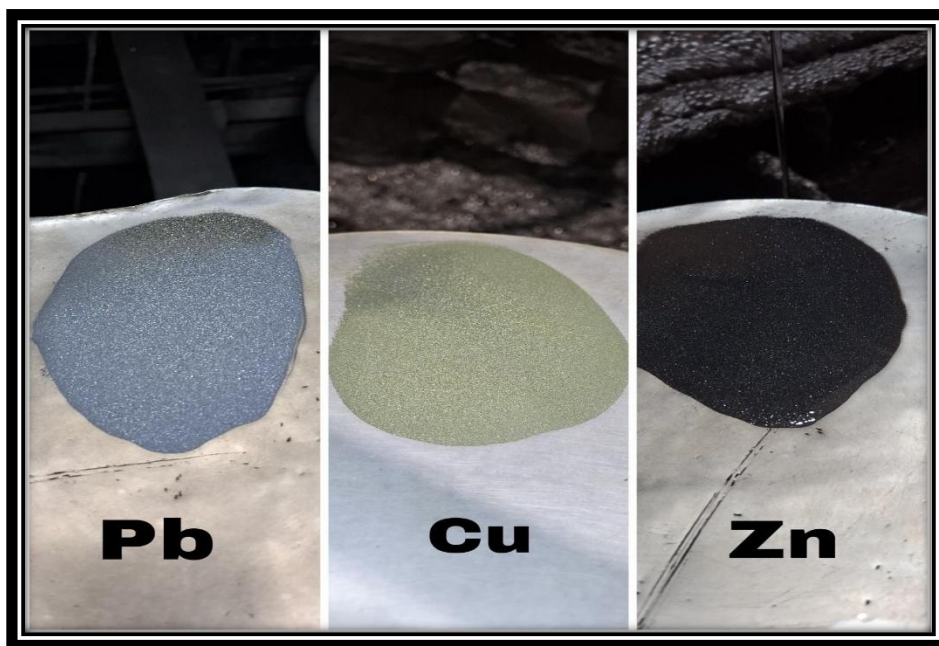


Figura 10. Concentrados metálicos Pb, Cu y Zn.

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.13 Metalurgia

Ciencia que investiga la obtención y el procesamiento de los metales a partir de los recursos minerales, en particular, de minerales metálicos. Esto se logra mediante el uso de tecnología y técnicas específicas. En otros términos, la metalurgia es un campo enfocado a la obtención y tratamiento de minerales (Metalurgia - Qué Es, Definición y Concepto, 2022).

3.13.1 Clasificación de la metalurgia

- **Electrometalurgia:** Son todos los procedimientos orientados a la obtención de metales, cuyo objetivo fundamental es la refinación de los mismos, que se logran por medio de procesos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos; en este método se emplea energía eléctrica para la obtención de los metales.
- **Pirometalurgia:** Son todos los procedimientos diseñados para extraer metales de sus minerales utilizando altas temperaturas, que pueden generarse a través del uso de combustibles o por reacciones químicas que pueden ser exotérmicas.



- **Hidrometalurgia:** Son todos los procedimientos diseñados para conseguir metales a partir de sus minerales utilizando reactivos químicos que inducen la disolución de los elementos metálicos para que luego, a partir de esta solución, se obtenga el metal (Roldán, 2010).

3.14 Planta de beneficio

Concretamente, la planta de beneficio es una instalación industrial donde se procesan los minerales extraídos de la mina y se realizan procesos mecánicos, físicos y químicos (Figueroa & Monreal, 2012). En resumen, son las labores de preparación, procesamiento, fundición inicial y refinación de productos minerales, en cualquiera de sus etapas, con el objetivo de recuperar u obtener minerales o compuestos, aumentando así su concentración y pureza (Ley de Minería, 2023).



Figura 11.Planta de Beneficio "Santa María".
Fuente: Elaboración propia 2025.



3.15 Flotación

En cuanto a la flotación, es un proceso fisicoquímico de separación y concentración de los metales de valor económico que están contenidos en un mineral (Roldán Arellano, 2010).



Figura 12. Celdas de flotación Denver.

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.15.1 Etapas de la flotación

- **Flotación primaria:** En esta etapa se sugiere flotar todo el mineral valioso para conseguir una alta recuperación y un alto grado; sin embargo, no todo el mineral valioso flota, ya que parte se pierde en las colas.
- **Flotación Agotativa:** En esta etapa se flotan todos los minerales valiosos que no flotaron en la flotación primaria; el concentrado resultante es de baja ley, ya que, para flotarlos, arrastra desechos que recirculan a las celdas primarias.
- **Flotaciones limpias:** En esta etapa, el mineral valioso que en la fase primaria flotó, lo hace junto con jales; esta etapa es necesaria para purificarlo al máximo y obtener un concentrado de excelente calidad (Roldán y Arellano, 2010).



3.15.2 Función de la flotación

Nos dice que la flotación es la agitación en agua y mineral finamente triturado, en una celda de flotación donde se añaden reactivos para combinarlos, los cuales harán que los minerales valiosos se unan a las burbujas creadas por una inyección de aire en la pulpa y suban a la superficie, mientras que el mineral sin valor queda suspendido en la pulpa (Roldán y Arellano, 2010).

3.16 Reactivos

Los reactivos son sustancias que se unen en una reacción química; pueden ser elementos, compuestos o mezclas de sustancias químicas. Su función es proporcionar los átomos y moléculas necesarias para crear o formar nuevos productos. También son compuestos utilizados para llevar a cabo una reacción química (Gqci & Gqci, 2023).



Figura 13. Reactivo Sulfato de Cu.

Fuente: Elaboración propia 2025.



3.16.1 Clasificación de los reactivos

- **Colectores:** Debido a que los minerales humedecidos no se adhieren a la burbuja, por consiguiente, debemos colocar un colector solo al mineral valioso para que la burbuja pueda elevarlo y flotarlo.
- **Modificadores:** En cuanto a los modificadores, estos buscan que solo el mineral valioso flote, evitando que otros minerales lo hagan; los modificadores se encargan de esta tarea para minerales específicos.
- **Espumantes:** Estos reactivos hacen que las burbujas sean más duraderas, de modo que alcancen la superficie sin estallar, permitiendo el tiempo necesario para extraer las partículas valiosas (Roldán y Arellano, 2010).

3.17 Jales

Los jales son materiales molidos que quedan después de que los minerales de interés han sido recuperados de las rocas que los contienen; incluyen también residuos de minerales no extraídos y partículas de reactivos utilizados para separar el mineral (Mexicano, 2019).



Figura 14. Muestra representativa de Jales.

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.18 Presa de jales

Respecto a una presa de jales, la cual es una obra de ingeniería consistente en apilamientos contruidos aguas arriba o aguas abajo. Su función es embolsar o contener dichos residuos, es decir, material molido sin valor que queda después de su procesamiento y se almacena en un área específica (Mexicano, 2019).



Figura 15. Presa de jales.
Fuente: Elaboración propia 2025..

3.19 Laboratorio metalúrgico

Área destinada para realizar análisis químicos, pruebas y ensayos mecánicos, con el fin de estudiar los beneficios y procesamientos de los minerales (FATESA, 2024).



3.20 La química

Es la ciencia que se encarga de analizar las estructuras, composiciones y transformaciones que experimentan las reacciones químicas de la materia. Además, su área de investigación abarca desde átomos y moléculas de materia (G. William Daub, 1996).

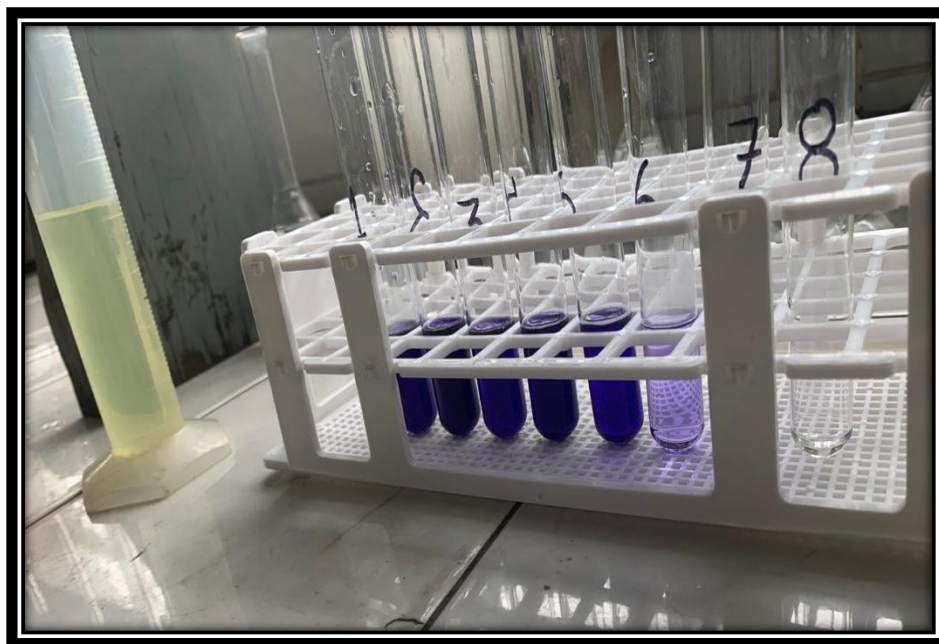


Figura 16 Química.

Fuente: Elaboración propia 2025.

3.21 Bioquímica

Ciencia que se enfoca en analizar las reacciones químicas de los procesos biológicos esenciales en todos los organismos vivos, lo cual se le denomina metabolismo celular. Adicionalmente, la bioquímica se enfoca en el estudio del medio ambiente, antropología, agricultura, medicina, etc. (Berg et al., 2007).

3.22 Química física (termodinámica)

Rama que estudia las estructuras de los elementos, la velocidad de cambio y la función del calor en transformaciones químicas termodinámicas. En resumen, la termodinámica se encarga de los intercambios de energía durante las reacciones químicas, aunque también se involucran procesos físicos para las transiciones de fase y creación de disoluciones (G. William Daub, 1996).





3.23 Química orgánica

Rama que estudia y analiza los componentes del carbono. En otras palabras, es la disciplina que analiza las estructuras y las reacciones de los compuestos que contienen carbono (Wade, 2017).

3.24 Química inorgánica

Rama que investiga las características como la formación y composición, estructura y las reacciones químicas de los elementos. En resumen, lleva a cabo la investigación de todos los compuestos donde no se involucran los enlaces carbono-hidrógeno (Ruiz et al., 2023).

3.25 Química analítica

Rama que se encarga de medir y analizar de manera cuantitativa y cualitativa compuestos y elementos. Además, se utiliza en diversas áreas de la ingeniería, investigación y medicina. En términos generales, la química analítica puede clasificarse en dos categorías, según el propósito del análisis químico (Crouch & Holler, 2020).

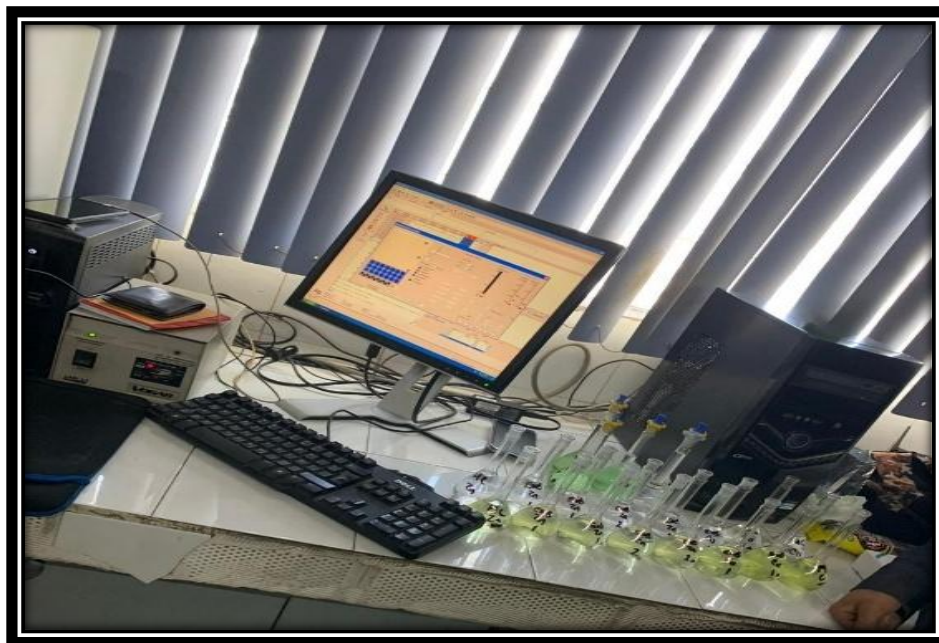


Figura 17. Análisis cuantitativo con método instrumental.

Fuente: Elaboración propia 2025.





3.25.1 Química analítica cuantitativa

Esta disciplina analítica se encarga de identificar las cantidades correspondientes y sus potenciales vínculos químicos en una muestra. En resumen, intenta determinar la cantidad, proporción o concentración de los distintos componentes (Burriel et al., 2008).

3.25.2 Química analítica cualitativa

Esta disciplina analítica identifica y reconoce el contenido que posee una muestra desconocida, como sus elementos o grupos químicos que la conforman (González, 2021).

3.26 Métodos cualitativos

Estos métodos se fundamentan en procesos químicos como la precipitación y otros cambios químicos. Encontramos los métodos clásicos denominados de la siguiente manera:

- **Pruebas de llama:** Análisis que nos permite determinar que sustancias elementales alberga nuestra muestra basándose en el color de la llama al quemar la muestra; no obstante, en qué proporción o medida (Quimitube, 2012).
- **Marchas analíticas:** Se le conoce como marcha analítica a cualquier sistema que facilite la separación e identificación de especies químicas, agrupándolas por su comportamiento distintivo ante su disolvente o reactivo; existen marchas para aniones y cationes (Briones, 2016).



3.27 Métodos de digestión ácida

Son esenciales para solubilizar la muestra sólida y llevar los metales a una fase líquida que pueda analizarse mediante técnicas volumétricas, gravimétricas, espectrofotométricas o instrumentales. Es decir, los ácidos se utilizan para la descomposición de las muestras, y para ello es necesario calentarlos sobre una parrilla caliente para lograr una disolución completa (Beliquimica Ingenieros, 2023).



Figura 18. Digestión ácida para análisis cuantitativo.

Fuente: Elaboración propia 2025.

- Ácido nítrico (HNO_3): Se utiliza frecuentemente para disolver sulfuros y óxidos metálicos, gracias a su capacidad oxidante, aunque no siempre logra descomponer completamente los minerales más refractarios a los silicatos.
- Ácido clorhídrico (HCl): Útil para solubilizar sales y formar complejos solubles, como los cloruros de plomo, pero resulta poco eficaz frente a matrices muy resistentes.
- Agua regia: Mezcla de ácido clorhídrico (HCl) y nítrico (HNO) permite atacar a la mayoría de los sulfuros y metales nobles, siendo especialmente útil en concentrados de plomo, zinc y cobre. Sin embargo, no logra disolver completamente los silicatos.
- Ácido perclórico (HClO_4): Garantiza la oxidación completa de los sulfuros y la eliminación de materia orgánica, agente oxidante potente; además, ataca a aleaciones de hierro y aceros



inoxidables que no se ven afectados por otros ácidos, aunque exige estrictas medidas de seguridad.

- Ácido fluorhídrico (HF): Capaz de descomponer el dióxido de silicio, aunque es sumamente tóxico y requiere equipos especiales.
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄): Este ácido concentrado descompone y disuelve la mayoría de los minerales, asegurando una mayor eficacia en caliente, provocando oxidación y deshidratación de compuestos orgánicos; sin embargo, los metales y aleaciones se ven afectados por el ácido en caliente.

3.28 Métodos cuantitativos

Estos métodos implican la determinación de cantidades de la especie en un conjunto de muestras. Estos métodos analíticos también se conocen como técnicas húmedas tradicionales e instrumentales (González, 2021).

3.28.1 Métodos analíticos cuantitativos

3.28.1.1 Métodos instrumentales

Los enfoques analíticos actuales se fundamentan principalmente en el empleo de herramientas científicas sofisticadas que tienen la capacidad de examinar muestras complejas de forma eficaz y exacta (deQuímica, 2025).

- Métodos electroanalíticos: Este método de análisis evalúa las alteraciones en la electricidad de las características electroquímicas de una muestra mediante la medición de magnitudes eléctricas relacionadas con el analito (Almeida, 2020).
- Métodos espectrométricos: Estos procedimientos analíticos se fundamentan en el fenómeno de la absorción de la luz de moléculas y átomos. Se fundamenta en la medición de la energía absorbida por moléculas y átomos, la cual incide en la emisión de luz al calentar los átomos a altas temperaturas. Esta disciplina estudia las interacciones entre la radiación y la materia. Se conocen como espectrometría de absorción atómica y espectrometría de emisión atómica (RPS Qualitas, 2010).



3.28.1.2 Métodos gravimétricos

Estos métodos establecen la masa de un analito o de un compuesto químico vinculado a este. La variación de masa de una muestra ocurre al ser sometida a tratamientos químicos y térmicos (Crouch & Holler, 2020).



Figura 19. Equipo de Absorción Atómica (EAA).
Fuente: Elaboración propia 2025.

3.28.1.3 Métodos volumétricos

Se refiere a todo aquel procedimiento que determina de manera indirecta la concentración de un analito en una muestra. Está fundamentado en la medición del volumen de un reactivo de concentración conocida necesario para reaccionar estequiométricamente con el analito. También se conoce como técnicas de titulaciones o valoraciones (Universidad de Murcia, 2011).

Además, este método volumétrico se fundamenta en determinar el punto de equivalencia y se representa de la siguiente manera:

$$n_{\text{eq. del titulante}} = n_{\text{eq. del titulado}} \quad (1)$$



González (2011), en su artículo, señala “Como los equivalentes son iguales a la concentración normal por el volumen, y se conoce la concentración del titulante, entonces medir su volumen implica que se conocerá el número de equivalentes del titulante, por lo tanto, del analito o titulado”. Esto se representa de la siguiente manera:

$$N_{\text{titulante}} \cdot V_{\text{titulante}} = N_{\text{titulado}} \cdot V_{\text{titulado}} \quad (2)$$

3.28.1.4 Tipos de volumetrías según su reacción química

- Volumetría acido-base: La reacción consiste en una neutralización ácido-base y el grado final de titulación se establece por la variación de color de un indicador químico.
- Volumetría de formación de complejos: La técnica aplicada consiste en la creación de un complejo de metal; en ocasiones suele tornarse de un color, y a veces no se observa ningún cambio de color.
- Volumetría de precipitación: Este método implica la creación de un precipitado insoluble (González, 2011).

3.29 Pasos para un análisis cuantitativo típico

Para llevar a cabo un análisis cuantitativo, es necesario seguir una secuencia de pasos que responda a los objetivos de estudio. Este proceso puede realizarse mediante distintos métodos y enfoques propios de la química analítica (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

1) La elección de un método analítico

Para dicha elección es necesario tomar en cuenta el nivel de exactitud y confiabilidad para el análisis. Asimismo, debe considerarse el tiempo necesario para la calibración de instrumentos, equipos y la preparación de soluciones estándar.





2) Obtención de la muestra

Para llevar a cabo un análisis, se necesita una muestra representativa del material; este material debe estar perfectamente homogenizado.

3) Preparación de una muestra de laboratorio

Por lo regular, en un laboratorio metalúrgico, llegan muestras sólidas, estas deben ser procesadas para un análisis efectivo donde se tritura para disminuir el tamaño de partícula, se homogeniza y se elimina la humedad (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

- Replicas o duplicados: Para mayor calidad en los resultados y una confiabilidad segura, es necesario que en los análisis se realicen réplicas o duplicados; generalmente, las mediciones cuantitativas se promedian.
- Preparación de disoluciones: Las disoluciones son demasiado cruciales para disolver por completo la muestra y el analito de manera rápida. Por esta razón, en los silicatos minerales u otros especímenes es necesario aplicar procedimientos físicos y químicos más agresivos para aumentar la solubilidad del analito.

Es común calentar la muestra con disoluciones de ácidos y bases fuertes, así como con agentes reductores u oxidantes fuertes. Puede realizarse una combinación de estos reactivos para lograr una digestión eficaz (Skoog, West, Holler & Crouch, 1996).

- Eliminación de interferencias: En este paso podemos encontrar interferencias que pueden afectar su medición final de analito; por tal motivo, se deben eliminar los interferentes presentes para un análisis eficaz.
- Cálculos de los resultados: Los cálculos se fundamentan tanto en los resultados experimentales obtenidos durante la etapa de medición como en las propiedades de los instrumentos empleados y en la estequiometría.
- Evaluación de los resultados: Implica comprobar qué tan confiables son. Un análisis no se considera completo si no estima su grado de precisión. Un análisis no se considera completo sin estimar su grado de precisión. El investigador debe indicar el nivel de





incertidumbre asociada a los cálculos, ya que solamente así los datos pueden considerarse válidos o útiles para el estudio (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

3.30 Estándares primarios

Nos dicen Ramos y Quispe (2018) que “Para llevar a cabo un análisis volumétrico de alta precisión, se basa considerablemente en el estándar principal empleado para determinar de manera directa o indirecta, la solución de la concentración”.

Los parámetros para un estándar primario son:

- Alto grado de pureza.
- Que no contengan agua.
- Poseer un peso equivalente.
- Consistencia.

3.30.1 Material de referencia certificada (MRC)

Ramos y Quispe (2018) nos revelan la importancia de MRC, afirmando que: Son muestras de ensayo homogéneos en los que el analito ha sido determinado cuidadosamente, normalmente por una serie de laboratorios especializados y preferiblemente utilizando una serie de técnicas analíticas diferentes, cuyos datos se utilizan para certificar los materiales en función de la concentración del analito que plantea esta cifra. Analizando periódicamente un material de referencia certificado (MRC) es posible comprobar la exactitud de los resultados que se están obteniendo. (p.46).

3.31 Estándares secundarios

Los estándares secundarios son soluciones químicas que se emplean frecuentemente en los laboratorios para llevar a cabo análisis cuantitativos, especialmente en valoraciones o titulaciones, y pueden ser desarrollados in-house (Cortes, 2019).





3.32 Fuentes de error en el análisis químico

Los errores cometidos en el análisis químico son sumamente aparatosos, ya que van acompañados de errores e incertidumbres, afectando las mediciones. Lo fundamental en estos análisis es reducir al mínimo los errores y estimar su magnitud con nivel de precisión aceptable. Para ello es necesario introducir y aplicar réplicas o duplicados de muestra, dado que los resultados obtenidos en conjunto de mediciones presentan una similitud entre sí, y se considera la mejor estimación al valor real (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

3.33 La media aritmética

En la estadística, se representa un valor central, la media es simplemente el valor que se obtiene al promediar dos o más mediciones (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

$$\text{Media} = \frac{X_1 + X_2 \dots}{N} \quad (3)$$

3.34 Precisión

La precisión en un análisis se refiere a qué tan repetibles son las mediciones, o cuán parecidos son los resultados cuando se hace un grupo de mediciones.

Los tres conceptos que se manejan con más frecuencia para expresar la precisión de los resultados obtenidos en un conjunto de mediciones repetidas; son la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación (Skoog, West, Holler y Crouch, 1996).

Desviación Estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4)$$

Donde:

s = desviación estándar

x_i = valor individual de cada medición





\bar{x} = media aritmética

n = número total de observaciones

Varianza:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (5)$$

Donde:

s^2 = varianza de la muestra

x_i, \bar{x}, n = se definen igual que la ecuación #

Coefficiente de variación:

$$CV (\%) = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

s = desviación de estándar

\bar{x} = media aritmética

CV = coeficiente de variación expresado en porcentaje

3.35 Exactitud

La exactitud indica qué tan cerca está un valor medido del valor real o aceptado, y para expresarla se utiliza el concepto de error (Skoog, West, Holler, & Crouch, 1996).

$$\text{Exactitud en\%} = \frac{\text{Valor media aritmética}}{\text{Valor real}} * 100 \quad (7)$$





- Error absoluto: Es una medición que se obtiene al restar el valor real del valor medido. Sin embargo, el signo de este error permite saber si la medición resultó mayor o menor que el valor verdadero.

$$\text{Error absoluto} = \text{Valor real} - \text{Valor aproximado} \quad (8)$$

- Error relativo: Es una medición que se obtiene al restar el valor real del valor medido. Sin embargo, el signo de este error permite saber si la medición resultó mayor o menor que el valor verdadero.

$$\text{ER\%} = \frac{\text{Valor real} - \text{Valor medido}}{\text{Valor real}} * 100 \quad (9)$$

3.36 NMX-EC-17025-IMNC-2000. Métodos de ensayo y calibración y validación del método

El laboratorio tiene como objetivo implementar métodos y técnicas analíticas modernas, adecuadas desde el punto de vista técnico para llevar a cabo todas las pruebas y calibraciones.

Cada vez que sea posible, se deberán emplearse métodos estandarizados, basados en normas reconocidas en el ámbito nacional e internacional, para garantizar la comparabilidad y la confiabilidad de los resultados.

En circunstancias en las que se implementen procedimientos creados internamente, no estandarizados o modificados, será crucial validar los mismos para asegurar que cumplan con los requerimientos de exactitud, precisión y reproducibilidad (IMNC, 2000).





3.37 Validación del método

La validación se entiende como el proceso mediante el cual se confirma, a través de un análisis y evidencia objetiva, que un método cumple con los requisitos necesarios para su propósito específico (IMNC, 2000).

Debe incluir la evaluación de parámetros como:

- Exactitud (veracidad).
- Precisión (repetibilidad y reproducibilidad).
- Límite de detección (LD).
- Límite de cuantificación (LC).
- Selectividad/especificidad.
- Linealidad.
- Rango.
- Robustez o estabilidad.



3.38 Importancia del análisis químico

Comprueba el cumplimiento de especificaciones técnicas y parámetros de la industria minero-metalúrgica, para mejorar los procedimientos de producción, para mejorar los procedimientos de producción y elevar la calidad de los productos; por último, examina y analiza fallos de calidad a través de los estudios. El análisis implica métodos sofisticados para identificar y cuantificar los elementos y compuestos presentes en una muestra, aclarando y clarificando su composición química de manera precisa y confiable (Metalinspec, 2021).



Figura 20. Técnicas analíticas.

Fuente: Elaboración propia 2025.



CAPITULO 4 – MARCO METODOLÓGICO

4.1 METODOLOGÍA

4.1.1 Enfoque de la investigación

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado que se trabajó con datos numéricos obtenidos del análisis químico de plomo en el concentrado mineral. El método volumétrico con digestión ácida se evaluó en términos de precisión, exactitud y variabilidad.

4.1.2 Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación tuvo un alcance explicativo, dado que no solo se limitó a describir o correlacionar variables, sino que buscó demostrar la relación de causa y efecto entre la optimización del método volumétrico y la calidad de los resultados analíticos en la determinación de plomo.

En este sentido, se planteó que la modificación en la técnica de digestión ácida, mediante la combinación de ácido perclórico y ácido sulfúrico, influyó directamente en la precisión, exactitud y reducción de la variabilidad de los análisis realizados a los concentrados de plomo.

4.1.3 Diseño de la investigación

El diseño fue de tipo experimental, ya que implicó la manipulación de la variable (técnica de digestión ácida) para observar su efecto sobre las variables dependientes (precisión, exactitud y variabilidad de los resultados).

El nivel de la investigación fue explicativo, puesto que pretendió demostrar cómo la modificación en el procedimiento de digestión ácida influyó directamente en la calidad de los resultados analíticos.





4.1.4 Recolección de muestras

La recolección de las muestras para este estudio se realizó directamente sobre los embarques de concentrado de plomo (Pb), empleando técnicas que aseguraron la representatividad y la integridad de la muestra, además de representar proporcionalmente el tonelaje embarcado.

4.1.5 Universo y muestra

4.1.5.1 Universo de estudio

El universo de estudio estuvo constituido por 42.630 toneladas de concentrado de plomo, producto final obtenido después del procesamiento de minerales en la planta de beneficio, este material fue transportado en góndolas para su comercialización en el puerto de Manzanillo.

4.1.5.2 Equipos y materiales utilizados para el muestreo y cuarteo

- Muestreador de suelos
- Charola metálica de acero inoxidable (60 cm × 40 cm × 10 cm)
- Lona (1 m x 1m)
- Espátula
- Báscula digital (TORREY L-EQ SERIES)
- Charola metálica de acero inoxidable (33.5 cm × 24.5 cm × 6 cm)
- Bolígrafos y fichas de papel
- Tamiz (WSTYLER) malla No. 100
- Bolsas de papel estraza No. ½
- Horno de secado (BINDER redLINE RE 115)
- Metate metálico (base de 60 cm × 50 cm) con plancha metálica con esfera (13 cm × 5 cm).





4.1.5.3 Tipo de muestreo

Se empleó un muestreo sistemático, el cual consistió en recolectar muestras de puntos equidistantes; para cada góndola cargada, se realizaron 20 incrementos distribuidos uniformemente con el muestreador, extrayendo el concentrado de forma vertical.

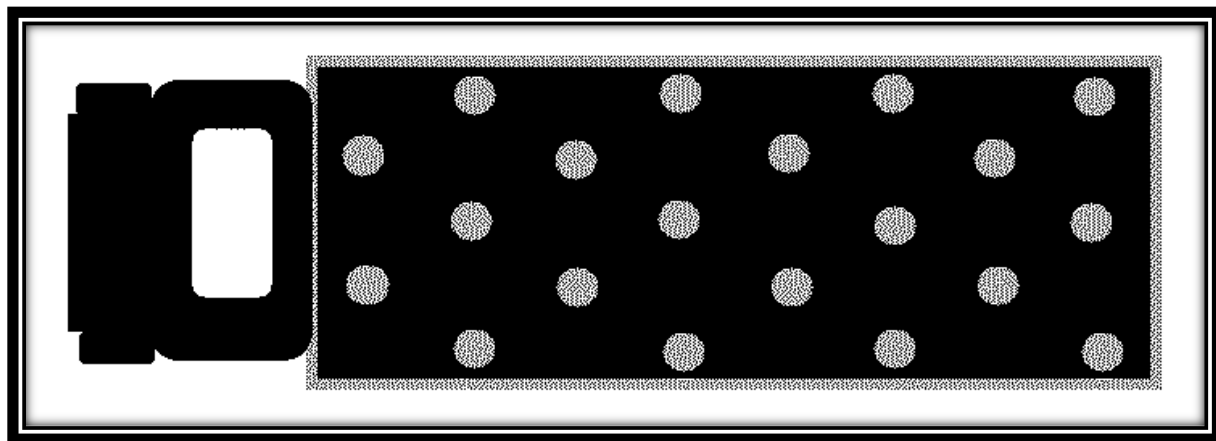


Figura 21. Incrementos realizados sobre la góndola.

Fuente: Elaboración propia, 2025

Muestreo sistemático: Se trata de un método en el que los puntos de muestreo elegidos se sitúan a intervalos equidistantes (Recomendaciones para Muestreo de Suelos, 2020).

Las muestras obtenidas fueron vertidas en una charola metálica, donde el material se homogeneizó y se extendió para realizar un segundo submuestreo sistemático de 20 incrementos. La muestra final recolectada fue transferida a otra charola metálica y pesó 8.0384 kg.





4.1.5.4 Técnica de cuarteo

Utilizando una lona y una espátula, se homogeneizó la muestra antes de realizar cada cuarteo. De cada cuarteo se eliminaron dos de las cuatro porciones obtenidas, repitiendo el proceso hasta alcanzar la cantidad requerida.

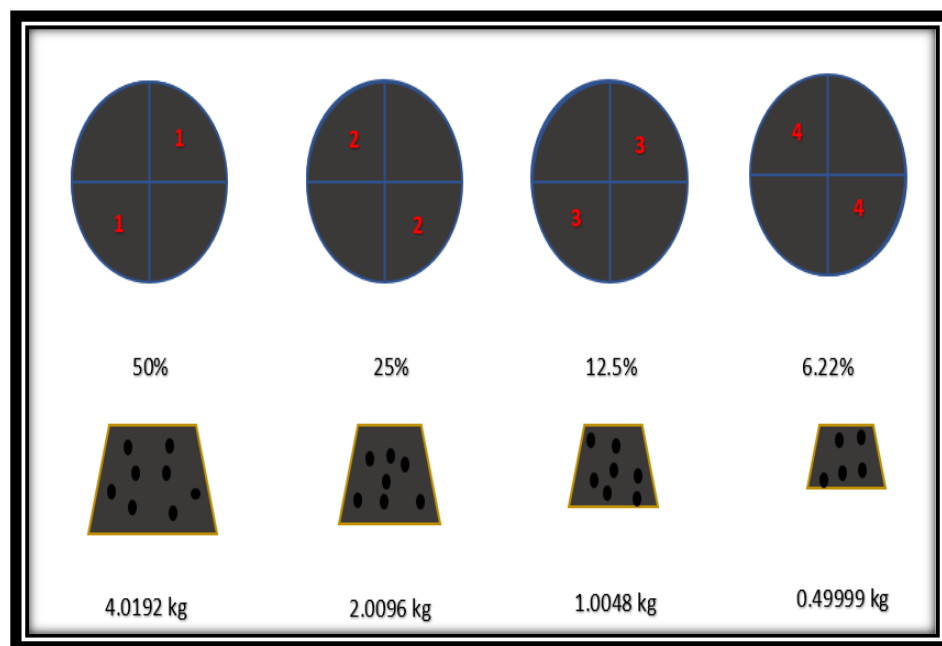


Figura 22 Representación gráfica de la técnica de cuarteo empleada para este trabajo de investigación.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Una vez finalizado el cuarteo y obtenida la muestra representativa, se procedió con la preparación del concentrado.



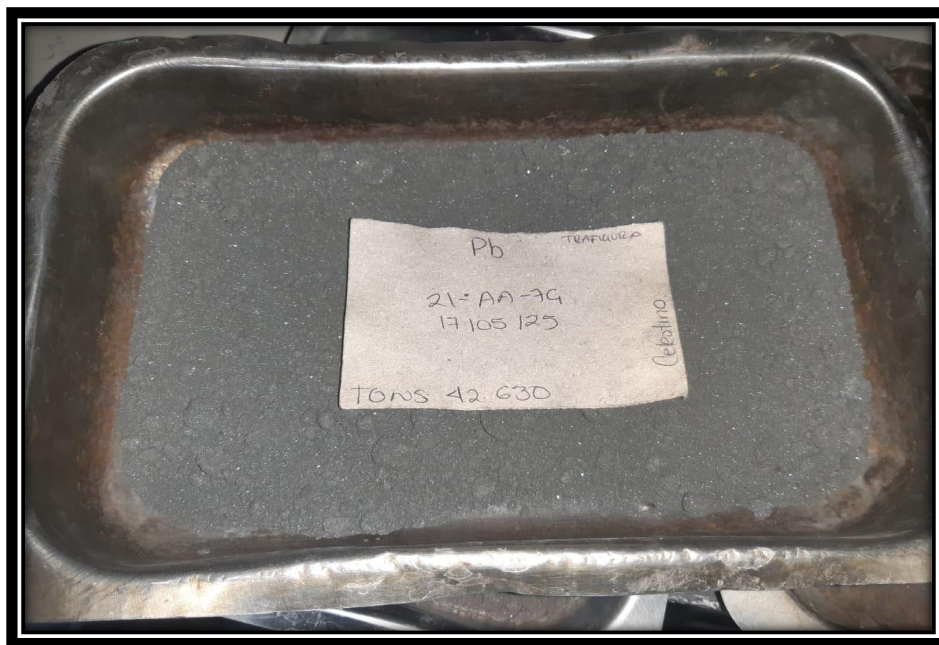


Figura 23. Muestra representativa de Pb.

Fuente: Elaboración propia 2025.

4.1.6 Preparación del concentrado

Primero, se pesó la muestra utilizando una báscula digital TORREY L-EQ SERIES, obteniendo un peso inicial de 499.99 gramos.

A continuación, la muestra se transfirió cuidadosamente a una charola metálica, la cual fue identificada con los datos correspondientes al embarque, incluyendo la fecha, el tipo de concentrado (Zn, Pb o Cu), la placa del tractocamión, el tonelaje y el nombre del conductor.

Una vez etiquetada, la charola con la muestra se colocó en un horno de secado BINDER redLINE RE 115, donde permaneció entre 100 °C y 120 °C durante aproximadamente 8 horas, con el fin de eliminar por completo la humedad presente.





Figura 24. Horno de secado redLINE.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Después del secado, la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente y, utilizando una báscula digital TORREY L-EQ SERIES se volvió a pesar, registrando un peso seco de 438.5 gramos. Con estos valores, se procedió a calcular el porcentaje de humedad del concentrado.

Seguido de esto, la muestra fue tamizada utilizando una malla número #100. El material que no logró pasar por la malla fue pulverizado manualmente con ayuda de un metate metálico, hasta asegurar que el 100% de la muestra atravesara la malla de forma uniforme.

Finalmente, la muestra homogeneizada se extendió sobre una lona para mezclarla completamente y luego se almacenó en una bolsa de papel estraza No. ½, rotulada con los datos correspondientes al embarque.





4.1.7 Determinación de plomo (Pb)

4.1.7.1 Principio del método

El principio del método se basa en la digestión ácida de la muestra para liberar el plomo contenido en ella. Primero se emplea ácido perclórico (HClO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) para oxidar y descomponer la matriz, convirtiendo el plomo presente en su forma iónica soluble. El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se utiliza como oxidante adicional para asegurar la completa disolución de la muestra.

Una vez en solución, el plomo se mantiene en un medio controlado (solución buffer) con un pH de 10 en específico que favorece la reacción selectiva con el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA de plomo), un agente que forma complejos muy estables con iones metálicos.

El indicador Xilenol Orange actúa señalando el punto final de la titulación: en presencia de plomo libre, la solución presenta un color grosella; cuando todo el plomo ha reaccionado con el EDTA, el indicador cambia a un color amarillo claro.

La cantidad de EDTA consumida en la titulación es directamente proporcional a la concentración de plomo en la muestra, lo que permite calcular su contenido mediante la relación estequiométrica entre el plomo y el EDTA.

4.1.7.2 Población y muestra

La muestra final utilizada consistió en 438.5 gramos de concentrado de plomo (Pb), obtenida del proceso de preparación descrito previamente.

4.1.7.3 Instrumentos y equipos

- Soporte para embudos
- Balanza analítica (AS 220.R2)
- Parrilla eléctrica o de gas
- Agitador magnético o varilla de agitación (plástico o de vidrio)
- Soporte universal





4.1.7.4 Materiales de laboratorio

- 8 vasos precipitados (Glassco, 400 mL)
- Bureta (Kimax, 50 mL)
- Vidrio de reloj (Glassco)
- Embudos (Glassco, 75 mm diámetro)
- Espátula
- Brocha de pelo de camello
- Papel filtro Whatman No. 4
- Pinzas metálicas

4.1.7.5 Reactivos

- Ácido perclórico MEYER (HClO_4) concentrado 69-98 %
- Ácido sulfúrico MEYER (H_2SO_4) concentrado 95-98 %
- Ácido ascórbico MEYER
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)
- Buffer para plomo (Pb)
- Xilenol orange
- EDTA
- Agua destilada

4.1.7.6 Preparación de reactivos

- **Solución buffer para Pb:** Disolver 400 g de acetato de amonio en 80 ml de ácido acético glacial, y completar hasta 1 L de agua destilada.
- **EDTA:** Disolver 9 g de sal disódica de EDTA en 1 L de agua destilada.
- **Xilenol orange:** Disolver 0.5 g del indicador en agua destilada y aforar a 100 mL.
- **Ácido ascórbico al 2%:** Disolver 2 g en agua destilada y aforar a 100 mL.





4.1.7.7 Procedimiento de análisis

Para el análisis, con la ayuda de la balanza analítica AS 200.R2 se pesaron con precisión 0.2500 gramos de muestra y se colocaron en un vaso de precipitado de 400 mL. Posteriormente, se añadieron 10 mL de ácido perclórico (HClO_4) y el vaso se llevó a una parrilla de calentamiento durante aproximadamente 10 minutos, o hasta que desaparecieron los vapores característicos del ácido perclórico, evitando en todo momento llegar a sequedad.



Figura 25. Digestión ácida con perclórico.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Una vez alcanzada esta condición, la muestra se retiró de la parrilla y se dejó enfriar por 10 minutos.

Con ayuda de agua destilada, se lavaron tanto el vidrio de reloj como las paredes internas del vaso. A continuación, se incorporaron 10 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el vaso se colocó nuevamente en la parrilla a calor intenso, hasta la desaparición total de los vapores sulfúricos.

Después del enfriamiento, se añadieron 100 mL de agua destilada, asegurándose de enjuagar tapa y paredes del recipiente, junto con 4 gotas de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).





La solución obtenida se filtró empleando papel filtro Whatman No. 4, realizando seis lavados con agua fría, cuidando que el sólido retenido no se traspasara al filtrado.



Figura 26.Filtrado de la muestra atacada.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Al vaso que contuvo la muestra inicial se le incorporaron 30 mL de solución buffer para plomo (Pb) y se enrasó hasta un volumen final de 200 mL. El papel filtro con el sólido retenido se regresó al vaso de ataque, troceándolo cuidadosamente para no perder material.





Figura 27. Vaso precipitado con el papel filtro troceado.
Fuente: Elaboración propia 2025.

La mezcla se llevó nuevamente a ebullición en la parrilla y, una vez retirada del calor, se añadieron 10 mL de ácido ascórbico y 4 gotas del indicador Xilenol Orange.

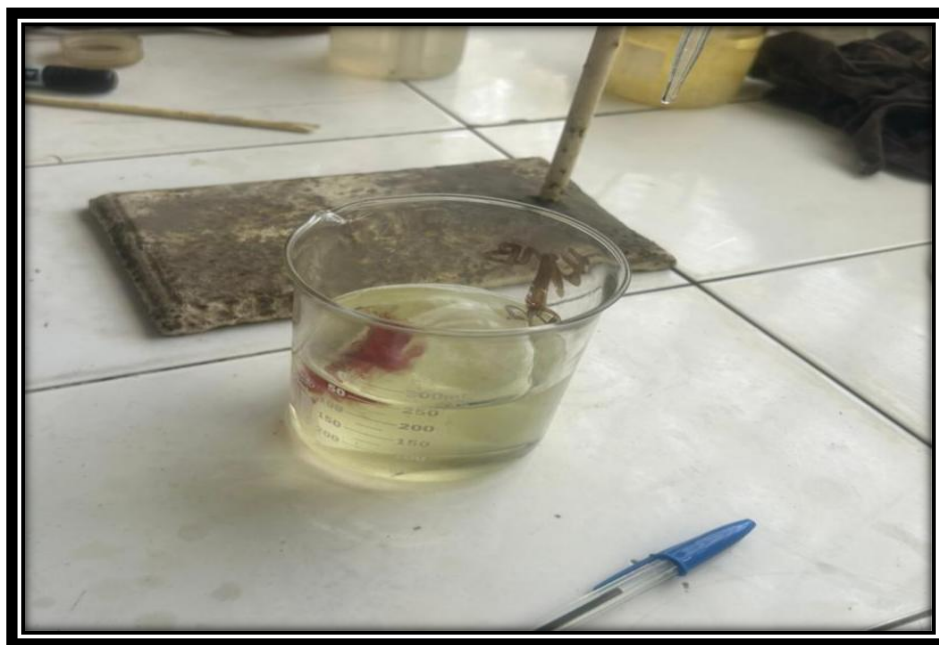


Figura 28 Agregado del indicador Xilenol Orange.
Fuente: Elaboración propia 2025.



Finalmente, la titulación se realizó en caliente utilizando EDTA como titulante para plomo, continuando hasta que la solución cambió de un color grosella a un amarillo claro.



Figura 29 Titulación se realizó en caliente.

Fuente: Elaboración propia 2025.



Figura 30 Solución cambió de un color grosella a amarillo.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Este procedimiento se aplicó para muestras: Pb2, Pb2*, Pb3 y Pb3*.





CAPITULO 5 - CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A lo largo de esta investigación y experimentación en los embarques de concentrado para la determinación de plomo (Pb), conocí y aprendí el impacto de los análisis químicos cuantitativos de minerales, son fundamentales para la industria minera y metalurgia, cabe destacar su importancia reside en determinar la composición exacta de los elementos presentes en una muestra (AMIQL, 2023).

En resumen, los análisis químicos cuantitativos son esenciales para maximizar el valor económico, eficiencia operativa, cumplir con regulaciones y minimizar impactos ambientales en la industria minera.

5.1. Cálculo para la determinación de humedad

Para calcular el porcentaje de humedad se ocupó la siguiente ecuación:

$$\text{Determinación de humedad} = \left(\frac{\text{peso neto humedo} - \text{peso neto seco}}{\text{peso neto humedo}} \right) * 100 \quad (10)$$

$$\text{Determinación de humedad} = \left(\frac{499.99 \text{ gr} - 438.5 \text{ gr}}{499.99 \text{ gr}} \right) * 100$$

$$\text{Determinación de humedad} = 12.29 \%$$

Tabla 1 Determinación de humedad.

Determinación de humedad		
Concepto	Toneladas (t)	Porcentaje de humedad (%)
Mineral húmedo	42.630	100 %
Mineral seco	37.390	87.71 %
Agua (contenido de humedad)	5.239	12.29 %



La medición de la humedad en los concentrados minerales resulta fundamental para asegurar la exactitud de los análisis y la calidad del producto, este procedimiento permite determinar la cantidad real de sólido seco, evitando desviaciones en la estimación del contenido metálico y en el valor comercial del concentrado. Asimismo, su control garantiza operaciones comerciales equitativas, el cumplimiento de estándares técnicos y una manipulación adecuada del material en las etapas de almacenamiento, transporte y procesamiento.



Figura 31. Cargado de concentrado.

Fuente: Elaboración propia 2025.

5.2. Cálculos para la determinación de plomo (Pb) %

Para calcular el contenido de Pb, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\%Pb = \frac{(\text{mL gastados de EDTA})(\text{Factor})(0.005)(100)}{\text{Peso de la muestra}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \%Pb2 &= \frac{(17.92 \text{ mL})(1.078)(0.005)(100)}{.2500} \\ \%Pb2 &= 38.63 \% \end{aligned}$$



$$\%Pb2 * = \frac{(17.89 \text{ mL})(1.078)(0.005)(100)}{.2500}$$
$$\%Pb2 * = 38.57 \%$$

$$\%Pb3 = \frac{(17.88 \text{ mL})(1.078)(0.005)(100)}{.2500}$$
$$\%Pb3 = 38.54 \%$$

$$\%Pb3 * = \frac{(17.86 \text{ mL})(1.078)(0.005)(100)}{.2500}$$
$$\%Pb3 * = 38.50 \%$$

Tabla 2 Resultados de la Determinación de Plomo.

Resultados de la determinación de Pb		
Muestras	Resultados	Material de Referencia Certificado (MRC)
<i>Pb1</i>	37.34 %	
<i>Pb1*</i>	36.91 %	
Pb2	38.66 %	
Pb2*	38.57 %	38.90%
Pb3	38.54 %	
Pb3*	38.50 %	

Nota. Los resultados de Pb1 y Pb1* fueron proporcionados por el área de laboratorio, fueron obtenidos a base de su método de volumetría anteriormente aplicado, sin embargo, Pb2, Pb2*, Pb3 y Pb3* se les aplico el nuevo método.





5.3. Cálculo para la media aritmética los resultados de los %Pb

La ecuación es siguiente:

$$\text{Media. Pb} = \frac{\text{Pb}\% + \text{Pb}\% *}{2}$$

$$\text{Media. Pb2} = \frac{\text{Pb2} + \text{Pb2} *}{2}$$

$$\text{Media. Pb2} = \frac{38.63 \% + 38.57 \%}{2}$$

$$\text{Media. Pb2} = 38.60 \%$$

$$\text{Media. Pb3} = \frac{\text{Pb3} + \text{Pb3} *}{2}$$

$$\text{Media. Pb3} = \frac{38.54 + 38.50}{2}$$

$$\text{Media. Pb3} = 38.52 \%$$

Estos valores de Pb1-Pb1 fueron proporcionados por el área de laboratorio, obtenidos a base de su método de volumetría anteriormente aplicado, del mismo modo se promedió sus resultados.*

$$\text{Media. Pb1} = \frac{\text{Pb1} + \text{Pb1} *}{2}$$

$$\text{Media. Pb1} = \frac{37.34 + 36.91}{2}$$

$$\text{Media. Pb1} = 37.12 \%$$





Tabla 3 Resultados Promediados (media).

Resultados Promediados		
Muestras	Promedio (media)	Material de referencia certificado (MRC)
Pb1-Pb1*	37.12 %	
Pb2-Pb2*	38.60 %	38.90 %
Pb3-Pb3*	38.52%	

Nota. Los resultados Pb1 y Pb1*, fueron proporcionados por el área de laboratorio, fueron obtenidos a base de su método de volumetría anteriormente aplicado.

La determinación del concentrado de plomo (Pb), el cual se obtuvo por el método volumétrico, sin embargo, se cambió la técnica de digestión ácida, aplicando reactivos como el ácido perclórico ($HClO_4$) y Sulfúrico (H_2SO_4), se obtuvo un promedio entre Pb2-Pb2* = 38.60 %, cerca del porcentaje de nuestra muestra de referencia certificada de %Pb=38.90, dicha muestra se mandó a Guanajuato, México, para un análisis volumétrico, cabe mencionar que el laboratorio privado es externo a la empresa y está acreditado o certificado.

De igual manera García, Zauahre, Moran, Acosta, Senior y Fernández (2006), en su artículo de investigación titulado “Análisis comparativo de dos técnicas para la determinación de metales pesados en lodos residuales”, obtuvieron resultados positivos, afirmando que la técnica de digestión ácida con perclórico ($HClO_4$) es muy efectiva para determinar metales pesados como Níquel (Ni), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Zinc (Zn), ya que es capaz de eliminar de manera efectiva las interferencias por la materia orgánica que es difícil de oxidar, planteando que la técnica es eficiente para la digestión para la determinación de Plomo (Pb).

El área de laboratorio químico, nos proporcionó los resultados de la determinación de Plomo (Pb), la que nombramos Pb1, anteriormente utilizaron el método de volumetría, con la técnica de digestión ácida con ácido nítrico y clorato de potasio, se le aplicaron los controles de preparación de muestras, algunos son: testigos y duplicado, de igual modo los criterios de aceptación que corresponden a: tamaño de partícula, humedad, una sola fase y precipitación.





5.4. Exactitud en % en referencia a nuestro material de referencia certificado

Para calcular la exactitud de Pb1-Pb1*, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Exactitud en\%} = \frac{\text{valor obtenido media aritmética}}{\text{Valor de la muestra certificada}} * 100$$

$$\text{Exactitud en\%} = \frac{37.12}{38.90} * 100$$

$$\text{Exactitud} = 95.42\%$$

Para calcular la exactitud de Pb2-Pb2*, se ocupó la anterior ecuación:

$$\text{Exactitud en\%} = \frac{38.60}{38.90} * 100$$

$$\text{Exactitud} = 99.22 \%$$

Para calcular la exactitud de Pb3-Pb3*, se ocupó la anterior ecuación:

$$\text{Exactitud en\%} = \frac{38.52}{38.90} * 100$$

$$\text{Exactitud} = 99.02 \%$$





Tabla 4. Exactitud de los resultados.

Exactitud de los resultados		
Muestras	Resultados de la determinación de %Pb	Exactitud %
MRC Pb	38.90 %	99.99 %
Pb1-Pb1*	37.12 %	95.42 %
Pb2-Pb2*	38.60 %	99.22 %
Pb3-Pb3*	38.52 %	99.03 %

Nota. La exactitud de la media Pb1-Pb1* se encuentra alejada a nuestro resultado de la MRC.

En la tabla 4 se muestra que la primera determinación (Pb1–Pb1*), con una exactitud del 95.42 %, presenta una ligera desviación respecto al valor de referencia, probablemente atribuible a errores experimentales menores, como variaciones en la preparación o en la titulación. En cambio, las muestras Pb2–Pb2* y Pb3–Pb3* alcanzaron exactitudes superiores al 99 %, lo que refleja una excelente concordancia con el valor certificado.

Medir con exactitud es clave en muchísimos campos, como la química. Tener datos precisos y confiables permite tomar buenas decisiones y lograr los mejores resultados posibles. Además, es fundamental entender que exactitud y precisión no son lo mismo, aunque estén conectadas. La exactitud tiene que ver con qué tan cerca está una medición del valor real, mientras que la precisión se refiere a qué tan consistentes y repetibles son esas mediciones (Fernández, 2010).





5.5. Error porcentual relativo (ER%)

Para calcular el error relativo (ER%), se necesita la siguiente ecuación:

$$ER\% = \frac{\text{valor del material de referencia certificado} - \text{valor medido}}{\text{valor del material de referencia certificado}} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb1} - \text{Pb1} = \frac{38.90\% - 37.12\%}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb1} - \text{Pb1} = \frac{1.78}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb1} - \text{Pb1} = 4.57\%$$

$$ER\% \text{ Pb2} - \text{Pb2} = \frac{38.90\% - 38.60\%}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb2} - \text{Pb2} = \frac{0.3}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb2} - \text{Pb2} = 0.77\%$$

$$ER\% \text{ Pb3} - \text{Pb3} = \frac{38.90\% - 38.52\%}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb3} - \text{Pb3} = \frac{0.38}{38.90\%} * 100$$

$$ER\% \text{ Pb3} - \text{Pb3} = 0.97\%$$





Tabla 5. Error relativo porcentual.

Error relativo porcentual (ER%)		
Muestras	Resultados en %Pb	ER %
MRC Pb	38.90 %	0 %
Pb1-Pb1*	37.12 %	4.57 %
Pb2-Pb2*	38.60 %	0.77 %
Pb3-Pb3*	38.52 %	0.97 %

El error relativo es una forma de medir que tan precisa es una estimación numérica en relación con el valor real. Esta medida resulta útil porque permite dimensionar el error en función del tamaño del valor real, lo que facilita comparar resultados, especialmente cuando se trabaja con cantidades muy distintas entre sí. En general, mientras más pequeño sea el error relativo, mayor será la precisión de la aproximación (Juárez, 2025).

En la tabla 5 se observa que la primera determinación (Pb1–Pb1*), con un ER de 4.57 %, presenta una desviación moderada respecto al valor de referencia, posiblemente asociada a factores experimentales como la digestión incompleta o pequeñas variaciones en la titulación. En contraste, las muestras Pb2–Pb2* y Pb3–Pb3* muestran errores relativos inferiores al 1 %, lo cual evidencia una alta exactitud del método analítico empleado

5.6. Error absoluto

Para calcular el error absoluto, se necesita la siguiente ecuación:

$$\text{Error absoluto} = \text{Valor real} - \text{Valor aproximado(media)}$$

$$\text{Error absoluto Pb1} - \text{Pb1 *} = 38.90 - 37.12$$

$$\text{Error absoluto Pb1} - \text{Pb1 *} = 1.78$$

$$\text{Error absoluto Pb2} - \text{Pb2 *} = 38.90 - 38.60$$

$$\text{Error absoluto Pb2} - \text{Pb2 *} = 0.3$$





$$\text{Error absoluto Pb3} - \text{Pb3}^* = 38.90 - 38.52$$

$$\text{Error absoluto Pb3} - \text{Pb3}^* = 0.38$$

Tabla 6. Error absoluto.

Error absoluto		
Muestras	Resultados	Error absoluto
	en %Pb (media)	
MRC Pb	38.90 %	0
Pb1-Pb1*	37.12 %	1.78 > 1
Pb2-Pb2*	38.60 %	0.3 < 1
Pb3-Pb3*	38.52 %	0.38 < 1

Los resultados de Pb1-Pb1* se encontró un error absoluto de $1.78 > 1$ lo que indica una ligera desviación respecto al material de referencia certificada, más sin embargo en promedio de la muestra Pb2-Pb2* se encontró un error absoluto de $0.3 < 1$, del mismo modo, que Pb3-Pb3* se encontró un error absoluto de $0.38 < 1$, reflejando una buena exactitud y una adecuada concordancia con el valor certificado., por lo tanto el ácido perclórico ($HClO_4$) caliente es un agente oxidante potente que logra una digestión completa, ataca aleaciones de hierro y aceros inoxidables proyectando la muestra, el ácido Sulfúrico (H_2SO_4) inicia la digestión, deshidratando y atacando la matriz sólida (Beliquimica Ingenieros, 2023).

Para expresar la precisión de un conjunto de resultados experimentales, se emplean parámetros estadísticos como la desviación estándar (s), la varianza (s^2) y el coeficiente de variación (CV).

Se calculo con la siguiente ecuación de Desviación Estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

$$Pb1-Pb1^* s = \sqrt{\frac{(37.54-37.12)^2 + (36.91-37.12)^2}{2-1}} = 0.3041$$





$$Pb2-Pb2^* s = \sqrt{\frac{(38.66-38.60)^2+(38.57-38.60)^2}{2-1}} = 0.0670$$

$$Pb3-Pb3^* s = \sqrt{\frac{(38.54-38.52)^2+(38.50-38.52)^2}{2-1}} = 0.0282$$

Se calculo con la siguiente ecuación de Varianza:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

$$Pb1 - Pb1 * s^2 = 0.3041^2 = 0.0925$$

$$Pb2 - Pb2 * s^2 = 0.0670^2 = 0.0045$$

$$Pb3 - Pb3 * s^2 = 0.0282^2 = 0.0007$$

Se calculo con la siguiente ecuación de Coeficiente de variación:

$$CV = \frac{s}{x} \cdot 100$$

$$Pb1 - Pb1 * CV(\%) = \frac{0.3041}{37.12} \cdot 100 = 0.8192 = 81.92 \%$$

$$Pb2 - Pb2 * CV(\%) = \frac{0.0670}{38.60} \cdot 100 = 0.1735 = 17.35 \%$$

$$Pb3 - Pb3 * CV(\%) = \frac{0.0282}{38.52} \cdot 100 = 0.0732 = 7.32\%$$

Tabla 7. Parámetros estadísticos.

Parámetros Estadísticos			
Muestras	Desviación estándar (s)	Varianza (s ²)	Coeficiente de Variación (CV %)
Pb1-Pb1*	0.3041	0.0924	81.92 %
Pb2-Pb2*	0.0670	0.0044	17.35 %
Pb3-Pb3*	0.0282	0.0007	7.32 %

La tabla 7 muestra el proceso numérico para juzgar los datos y proporcionar la evidencia que el método tiene el nivel deseado, la desviación estándar indica que la dispersión de los





resultados con respecto al promedio se reduce notablemente, es decir, las mediciones se vuelven más consistentes y reproducibles.

Conforme a la varianza es el cuadro de la desviación estándar, confirma la misma tendencia: cada vez hay menos variabilidad entre las réplicas.

El coeficiente de variación es especialmente útil porque expresa la dispersión en relación con la media. El valor de $Pb1-Pb1^*$ que es de 81.92% indica baja precisión, mientras que $Pb2-Pb2^*$ obtuvo 17.35 % se considera aceptable y $Pb3-Pb3^*$ obtuvo 7.32 %, se considera este resultado muy bueno para el método no normalizado.

5.7. Validación del método

De acuerdo con la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000, los métodos no normalizados o aquellos modificados por el laboratorio propio, deben someterse a un proceso de validación que respalde su adecuada técnica antes de su aplicación rutinaria (IMNC, 2000).

La validación se realizó considerando los principales parámetros de desempeño analítico, conforme a los criterios establecidos por la norma antes citada.

- Exactitud (Veracidad): La exactitud del método se evaluó comparando los resultados obtenidos con los valores de referencia de un material patrón certificado.
- Precisión (Repetibilidad y Reproducibilidad): La precisión se determinó mediante el análisis de muestras por duplicado bajo las mismas condiciones experimentales.
- Linealidad: La linealidad del método se verificó preparando una serie de soluciones estándar de plomo con diferentes concentraciones, estableciendo la relación entre la concentración del analito y el volumen de EDTA consumido en la titulación.
- Límite de Detección (LD) y Límite de Cuantificación (LC): Los valores obtenidos evidencian que el método es capaz de detectar y cuantificar concentraciones bajas de plomo con confiabilidad, garantizando su sensibilidad analítica.
- Selectividad: Se verificó la capacidad del método para determinar plomo sin interferencias de otros metales presentes en la matriz mineral. Mediante pruebas comparativas, se comprobó que la digestión ácida elimina eficazmente las posibles interferencias, asegurando la selectividad del método frente a otros iones metálicos.
- Robustez: La robustez se evaluó introduciendo pequeñas variaciones controladas en las condiciones de análisis (volumen de ácidos, tiempo de digestión y temperatura).





- Estimación de la Incertidumbre: Finalmente, se estimó la incertidumbre de medición considerando los principales factores que contribuyen al resultado final: precisión del volumen de titulación, concentración del EDTA, pureza de los reactivos y repetibilidad del analista.

5.8 Errores comunes durante la descomposición de muestras

Existen varios factores que pudieron causar errores durante la descomposición de las muestras Pb1-Pb1*, con frecuencia, estos afectan la precisión que se puede alcanzar en el análisis.

- Disolución incompleta del analito: Es fundamental que la muestra se disuelva completamente durante el tratamiento. Si se intenta extraer de forma cuantitativa el analito de un residuo que no se disuelve, normalmente no se logra, ya que parte del analito queda atrapado en ese residuo.
- Pérdidas por volatilización: Algunos compuestos como el dióxido de carbono, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno y telurio de hidrógeno tienden a evaporarse cuando se disuelven en ácidos fuertes.
- Contaminación del analito por el disolvente: En muchos casos, la cantidad de disolvente utilizada para disolver la muestra es mucho mayor (hasta 10 o 100 veces) que la masa de la muestra. Esto puede introducir contaminantes que alteran los resultados.
- Contaminación por reacción del disolvente con el recipiente: A altas temperaturas, es común que el disolvente reaccione con las paredes del vaso de reacción, lo que también puede introducir impurezas y afectar la precisión del análisis (Ramos et al, 2023).





CAPITULO 6 - CONCLUSIONES

De acuerdo con la investigación realizada en el progreso volumétrico para determinación de plomo, se llegó a las siguientes conclusiones:

El método volumétrico implementado para la determinación de plomo en concentrados minerales demostró ser preciso, exacto y confiable tras su evaluación mediante parámetros estadísticos y analíticos.

Los resultados obtenidos reflejaron una mejora progresiva en la precisión, evidenciada por la disminución de la desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, lo que indica una mayor reproducibilidad entre las réplicas analizadas. Estos parámetros no se comparan con el valor verdadero, sino que evalúan qué tan juntos están los resultados entre sí.

Cuanto menor sea la desviación o el CV, más preciso y reproducible es el método.

De igual manera, los valores de error absoluto y error relativo porcentual fueron bajos en las últimas determinaciones, mientras que la exactitud alcanzó valores superiores al 99 %, confirmando una excelente concordancia con el valor de referencia certificado. Estos parámetros se comparan con los resultados con el valor de referencia. Cuanto menor sea el error o mayor la exactitud, más veraz es el método.

En conjunto, estos resultados verifican que el procedimiento propuesto cumple con los criterios de exactitud y precisión establecidos por la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 para métodos no normalizados, garantizando la confiabilidad de los datos analíticos y la adecuación del método para su aplicación en el control de calidad de concentrado mineral de plomo.

El costo operativo del método analítico empleado es ligeramente más elevado. Esta innovación técnica representa el aporte más importante de la investigación, ya que incrementa la confiabilidad del análisis cuantitativo. Asimismo, garantizar resultados analíticos correctos es fundamental debido a las implicaciones técnicas, económicas y legales que puede generar un análisis erróneo, especialmente en la comercialización de concentrados y en minería una diferencia de solo 1% de Pb puede representar miles o millones de pesos según la cantidad de toneladas.





CAPITULO 7 - RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda aplicar este método únicamente en laboratorios que cuenten con una campana o chimenea extractora especial para ácido perclórico y con personal capacitado en el manejo de reactivos peligrosos.
- ✓ Es importante controlar cuidadosamente el pH de la solución durante la titulación, ya que esto influye directamente en la formación del complejo plomo-EDTA y en la claridad del punto final.
- ✓ Para garantizar la calidad de los resultados, se sugiere trabajar con material de referencia certificado (MRC) y realizar análisis en blanco que permitan detectar posibles interferencias o pérdidas durante la digestión.
- ✓ Dado que este procedimiento está diseñado para concentraciones relativamente altas de plomo, no se recomienda para la detección de niveles traza. En esos casos, sería más adecuado utilizar técnicas instrumentales como espectroscopía de absorción atómica (AAS) o espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).





8. REFERENCIAS

- Almeida, C. D. (2020, octubre 21). Métodos electroquímicos. Docsity.
<https://www.docsity.com/es/docs/metodos-electroquimicos/5934417/>
- ANÁLISIS MINERALES ITALIA QUÍMICA LABORATORIO. (2023). Análisis químicos en minerales.
<https://italiaquimica.com/analisis-quimicos-en-minerales/>
- Arellano, I. G. (2010). Concentración de los minerales I. Curso de Concentración de los Minerales I. Pachuca, México.
- Bautista, M. F. (2021, junio). Análisis jurídico de la aplicabilidad de la legislación minera en el municipio de Zimapán. Zimapán, Hidalgo.
- Beliquimica Ingenieros. (2023, febrero 23). Descomposición de muestras.
<https://beliquimica.com.pe/descomposicion-de-muestras/>
- Berg, J. M., Tymoczko, J., & Stryer, L. (2007). Bioquímica. Reverté.
- Boletín Estadístico y Geográfico. (2022).
https://gisviewer.semarnat.gob.mx/bol/11_2202/
- Briones, J. M. (2016). Marchas analíticas [Archivo PDF]. Scribd.
<https://es.scribd.com/document/324457228/MARCHAS-ANALITICAS>
- Burriel Martí, F., Lucena Conde, F., Arribas Jimeno, S., & Hernández Méndez, J. (2008). Química analítica cualitativa (2ª ed.). Ediciones Paraninfo.
<https://books.google.com.mx/books?id=QChYqMIUIL8C>
- CIENCIA Y DATOS.ORG. (2024). Evolución e importancia de la química analítica.
<https://cienciaydatos.org/laboratorio/evolucion-e-importancia-de-la-quimica-analitica/>
- Cortés, F. C. (2019). Preparación de muestras y estándares.
- Crouch, S., & Holler, F. (2020). Fundamentos de química analítica (9ª ed.).
<https://archive.org/details/fundamentosdequimicaanalitaskoog9ed>
- Secretaría de Economía. (2024). Minería. gob.mx.
<https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- deQuímica. (2025). Análisis instrumental.
<https://dequimica.com/teoria/analisis-instrumental>
- Skoog, D. A., & West, D. M. (1996). Fundamentos de química analítica. Reverté.





FATESA. (2024, agosto 15). Laboratorio metalúrgico.

<https://www.fatesa.mx/laboratorio-metalurgico>

Fernández, G. (2010, noviembre 7). Exactitud y precisión. Química Física.

<https://www.quimicafisica.com/fundamentos-de-quimica/exactitud-y-precision.html>

Figueroa Ibarra, B., & Monreal Saavedra, R. (2012). Mi México es minero. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México.

Daub, G. W., & Seese, W. (1996). Química. Pearson Educación.

García, H., Zauahre, M., Morán, H., Acosta, Y., Senior, A., & Fernández, N. (2006). Análisis comparativo de dos técnicas de digestión. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 11.

González, A. (2021, junio 28). Química analítica. Lifeder.

<https://www.lifeder.com/quimica-analitica/>

GQCI. (2023, agosto 6). ¿Qué son los reactivos en una reacción química? Educación Activa.

<https://educacionactiva.org/que-son-los-reactivos-en-una-reaccion-quimica/>

GRUPO ORS CONSULTORES ELÉCTRICOS ESPECIALIZADOS. (2023, abril 26). ¿Qué es la minería en México?

<https://grupoors.com.mx/2023/04/26/que-es-la-mineria-en-mexico/>

Hernández Acosta, E., Mondragón Romero, E., Cristóbal Acevedo, D., Rubiños Panta, J., & Robledo Santoyo, E. (2009). Ciencia y Sociedad, 15(2).

SciELO. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n2/v15n2a4.pdf>

HLC Sistemas. (2020, enero 7). De qué manera está presente la química en la minería. <https://www.hlcsac.com/noticias/de-que-manera-esta-presente-la-quimica-en-la-mineria/>

Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC). (2000). NMX-EC-17025-IMNC-2000: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. <http://integra.cimav.edu.mx/intranet/data/files/calidad/documentos/NMX-EC-17025-IMNC-2000.pdf>

INEGI. (2019). Minería.

<https://www.inegi.org.mx/temas/mineria/>

Juárez, M. G. (2025). Errores absolutos y relativos. Probabilidad y Estadística.

<https://www.probabilidadyestadistica.net/errores-absolutos-y-relativos/>





Cámara de Diputados. (2023, mayo 8). Ley de Minería.

<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LMin.pdf>

Manrique, N. (1961, julio 20). La química analítica en la industria minera.

Metalinspec. (2021). Análisis químicos. Metalinspec Laboratorio de Pruebas.

<https://www.metalinspeclaboratorios.com.mx/pruebas/analisis-quimicos>

Metalurgia. (2022). Definición y concepto de metalurgia.

<https://definicion.edu.lat/economia/metalurgia.html>

Servicio Geológico Mexicano. (2019, octubre 1). Información ciudadana sobre jales. gob.mx.

<https://www.gob.mx/sgm/articulos/informacion-ciudadana-sobre-jales>

Moreno Tovar, R., Téllez Hernández, J., & Monrroy Fernández, M. (2012, mayo). Análisis de concentrados minerales. SciELO.

<https://scielo.org.mx/pdf/rica/v28n3/v28n3a3.pdf>

National Library of Medicine. (2021). Bookshelf: Lead Toxicity.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK581819/>

Ondarse Álvarez, D. (2024, octubre 24). Plomo. Concepto.

<https://concepto.de/plomo/>

Pérez Porto, J., & Merino, M. (2022, febrero 1). Volumetría. Definición.de.

<https://definicion.de/volumetria/>

Quimitube. (2012, noviembre 12). Ensayos de coloración a la llama para los elementos químicos. <https://www.quimitube.com/ensayos-de-coloracion-a-la-llama-para-los-elementos-quimicos/>

Ramos Hernández, D., Reyna Torres, D. A., Esquivel Ramírez, M. G., & Ramos Cruz, M. J. (2023). Descomposición y disolución de muestras [Archivo PDF]. Scribd.

<https://es.scribd.com/document/760012068/DESCOMPOSICION-Y-DISOLUCION-DE-MUESTRAS>

Ramos Meza, E. F., & Quispe Pérez, J. (2018). Determinación del intervalo de confianza en análisis de minerales de plomo por métodos volumétricos y de absorción atómica.

Huancayo, Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3856a082-04d6-4934-b712-9e4cad33583f/content>

Real Academia Española. (2024). Diccionario de la lengua española.

<https://dle.rae.es/plomo>





- Redacción. (2024, mayo 8). ¿Qué es la minería en México? Grupo ORS.
<https://grupoors.com.mx/2023/04/26/que-es-la-mineria-en-mexico/>
- Roldán Arellano, G. R. A. (2010). Concentración de minerales I [Diapositivas].
- Roldán, G. R. (2010). Hidrometalurgia y electrometalurgia [Diapositivas].
- RPS Qualitas. (2010). Introducción a los métodos espectrométricos. RPS Qualitas Consultoría de Calidad y Laboratorios.
https://www.rpsqualitas.es/documentacion/downloads/instrumental/introduccion_a_los_metodos_espectrometricos.pdf
- Ruiz Sánchez, C. I., Herrera Feijo, R. J., Correa Salado, M., & Peñafiel Arcos, P. A. (2023). Fundamentos teóricos de química inorgánica. Grupo AEA.
- Santillán, A., & Santillán, A. (2024, septiembre 3). Hidalgo, un estado con una rica historia minera. Mining México. <https://miningmexico.com/hidalgo-un-estado-con-una-rica-historia-minera/>
- United Nations Environment Programme. (2010, diciembre). Final review of scientific information on lead.
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27635/LeadRev.pdf>
- Universidad de Murcia. (2011). Tema 4: Métodos analíticos.
<https://www.um.es/documents/4874468/11830096/tema-4.pdf/0ef11661-8d05-43e3-8edb-10b8bc21351b>
- Universidad de Valencia. (s. f.). Métodos cualitativos.
<https://www.uv.es/gidprl/cualitativo1/index>
- Wade, L., & Wade, L. (2017). Química orgánica (Vol. 1). Pearson.

