



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Determinación de un proceso de limpieza de crisoles de grafito para reducir costos de operación en el análisis de minerales

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Kevelin Natividad LOYOLA HUAYNALAYA

ASESOR

Mg. Máximo Medardo LEYVA CABALLERO

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Loyola, K. (2024). *Determinación de un proceso de limpieza de crisoles de grafito para reducir costos de operación en el análisis de minerales*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Kevelin Natividad Loyola Huaynalaya
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72838119
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Máximo Medardo Leyva Caballero
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08207414
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8082-9959
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Roberto Robles Calderon
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06078749
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Víctor Manuel Fernández Guzmán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06690674
Datos de investigación	
Línea de investigación	Desarrollo e innovación de procesos. Tecnología e innovación en minería responsable

Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2024 - Agosto 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "II Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-I", bajo la Presidencia del **Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN**; el **Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN** (Miembro) y el **Mg. MÁXIMO MEDARDO LEYVA CABALLERO** (Asesor); habiendo presentado para tal efecto el **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, titulada "**Determinación de un proceso de limpieza de crisoles de grafito para reducir costos de operación en el análisis de minerales**" después de **SUSTENTADA Y APROBADA** el trabajo de suficiencia profesional elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **LOYOLA HUAYNALAYA, KEVELIN NATIVIDAD**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO

(LETRAS)

18

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 17 de agosto del 2024

Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN

Presidente

Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN

Miembro

Mg. MÁXIMO MEDARDO LEYVA CABALLERO

Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE

Director de la E.P. de Ingeniería Química





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, MÁXIMO MEDARDO LEYVA CABALLERO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000656-2024-D-FQIQ/UNMSM del trabajo de suficiencia profesional, cuyo título es **Determinación de un proceso de limpieza de crisoles de grafito para reducir costos de operación en el análisis de minerales**, presentado por la bachiller **Kevelin Natividad Loyola Huaynalaya** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 4% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 22 de agosto de 2024

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Máximo Medardo Leyva Caballero

DNI: 08207414

AGRADECIMIENTO

Agradezco el amor, la guía y el apoyo incondicional de mi querida madre, Edith Huaynalaya.

A mi querido abuelo Arsenio Huaynalaya, por su eterno amor y sabiduría.

A mi padrino Nemesio, por ser de inspiración en mi vida profesional.

A Mario, por su perspicacia y mente inquieta que motivaron esta investigación.

A Magalli por su gran consideración y confianza al permitirme desarrollar este proyecto.

DEDICATORIA

*"El verdadero valor no es la ausencia de miedo, sino la
perseverancia en el amor y la amistad a pesar de él."*

J.R.R. Tolkien, El Señor de los Anillos: La Comunidad del Anillo.

A mi querida madre, en cada momento de
incertidumbre y desafío su luz ha sido mi guía constante. Su
amor incondicional, el pilar que ha mantenido el equilibrio en mi
vida, mi vector newtoniano; mi fuerza y dirección. Por ser una
valiosa aleación de valentía y lealtad, ejemplo constante de lo
que significa la verdadera grandeza, el mayor testimonio de
fuerza y mi más grande inspiración.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE	iv
ABREVIATURAS.....	vi
SIMBOLOGÍA	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas	viii
Lista de Gráficas	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
I. Información Del Lugar Donde Se Desarrolló La Actividad.....	3
II. Planteamiento Del Problema.....	4
2.1. Descripción del problema	4
2.2. Justificación	5
2.3. Finalidad y objetivos de la actividad.....	6
III. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	8
3.1. Antecedentes	8
3.2. Marco Teórico.....	11
3.2.1. Procedimiento de limpieza de crisoles de grafito para análisis de elementos trazas	11
3.2.2. Punto de fusión	12
3.2.3. Fusión con Metaborato de Litio	13
3.2.4. Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).....	14
3.2.5. Control estadístico de la calidad	14
3.2.6. Análisis de costos.....	16
3.2.7. Crisol.....	20
IV. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	22
4.1. Establecimiento de una metodología de limpieza de crisoles de grafito.....	22
4.2. Verificación de la efectividad de la técnica de limpieza de crisoles de grafito empleada	23
4.3. Reducción de costos de operación	23
V. PROCEDIMIENTO	24
5.1. Limpieza de crisoles	25
5.1.1. Limpieza Física.....	25

5.1.2. Limpieza Química.....	27
5.2. Análisis estadístico de control de calidad	29
5.2.1. Limpieza física.....	29
5.2.2. Limpieza química.....	33
5.3. Análisis de costos.....	37
5.3.1. Limpieza Física.....	37
5.3.2. Limpieza Química.....	45
VI. RESULTADOS	50
6.1. Comparación entre técnicas	50
6.1.1. Gráficas de control de calidad por analito	50
6.1.2. Efectividad de las técnicas de limpieza.....	52
6.1.3. Costo de las técnicas de limpieza.....	53
6.1.4. Impacto económico de las técnicas de limpieza	53
6.2. Limpieza física.....	54
6.2.1. Análisis estadístico de control de calidad	54
6.2.2. Análisis de costos.....	61
6.3. Limpieza Química.....	62
6.3.1. Análisis de control estadístico de calidad	62
6.3.2. Análisis de costos.....	72
VII. CONCLUSIONES.....	74
VIII. REFERENCIAS.....	76
IX. ANEXOS	79

ABREVIATURAS

ICP-MS: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.

L.D.: Límite de detección del equipo ICP-MS.

RR. HH. Departamento de recursos humanos dentro de la empresa.

SIMBOLOGÍA

Cu: Elemento químico cobre

HCl: Ácido clorhídrico

HNO₃: Ácido Nítrico

Nb: Elemento químico niobio

Si: Elemento químico silicio

Zn: Elemento químico zinc

Zr: Elemento químico circonio

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Crisol de grafito.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Diagrama de flujo del proyecto.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3. Pulidor de crisoles. a) Pulidor de crisoles de grafito. b) Base fija porta crisoles.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4. Pulidor de crisoles de grafito. a) Punta pulidora acondicionada. b) Base fija porta crisoles.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5. Diagrama de flujo de la técnica de limpieza física.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Diagrama de flujo de la técnica de limpieza química.</i>	<i>28</i>

Lista de Tablas

Tabla 1. Concentraciones de cobre en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.	30
Tabla 2. Concentraciones de niobio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.	31
Tabla 3. Concentraciones de silicio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.	31
Tabla 4. Concentraciones de zinc en análisis de blancos por fusión leídas con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.	32
Tabla 5. Concentraciones de circonio en análisis de blancos por fusión leídas con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.	33
Tabla 6. Concentraciones de cobre en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.	34
Tabla 7. Concentraciones de niobio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.	34
Tabla 8. Concentraciones de silicio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.	35
Tabla 9. Concentraciones de zinc en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.	36
Tabla 10. Concentraciones de circonio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.	36
Tabla 11. Costos implicados en la limpieza física.	38
Tabla 12. Costo de equipos en la limpieza física.	38
Tabla 13. Costo del pulidor de crisoles de grafito.	38
Tabla 14. Costo del taladro para implementar el pulidor de crisoles de grafito.	39
Tabla 15. Costo de depreciación del taladro.	39
Tabla 16. Costo mantenimiento preventivo del taladro.	40
Tabla 17. Costo de inactividad por mantenimiento preventivo del taladro.	40
Tabla 18. Costo del porta crisol para pulir crisoles de grafito.	41
Tabla 19. Costo de depreciación del porta crisol.	41
Tabla 20. Costo de mantenimiento preventivo del porta crisol.	41
Tabla 21. Costo del soplete.	42
Tabla 22. Costo de depreciación del soplete.	42
Tabla 23. Costo de mantenimiento preventivo del soplete.	42
Tabla 24. Costo de inactividad por mantenimiento del soplete.	43
Tabla 25. Costo de energía en la limpieza física.	43
Tabla 26. Costo de energía del pulidor.	43

Tabla 27. Costo de energía del soplete.....	43
Tabla 28. Costo de materiales en la limpieza física.	44
Tabla 29. Costo de accesorios para el pulidor.....	44
Tabla 30. Costo de recursos humanos para la limpieza física.	44
Tabla 31. Costos asociados a la limpieza química.....	45
Tabla 32. Costo de agua ultrapura para la limpieza química.	46
Tabla 33. Costo de ácido clorhídrico para la limpieza química.	47
Tabla 34. Costo de ácido nítrico para la limpieza química.....	47
Tabla 35. Costo de envase de teflón.	48
Tabla 36. Costo de depreciación de dispensadores.....	48
Tabla 37. Comparación del control de calidad entre la técnica física y la técnica química de limpieza.	52
Tabla 38. Diferencia porcentual en el control de calidad entre la técnica física y la técnica química de limpieza.	52
Tabla 39. Comparación entre los costos de las técnicas de limpieza.....	53
Tabla 40. Impacto económico de las técnicas de limpieza de crisoles de grafito.	53
Tabla 41. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de cobre con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.....	54
Tabla 42. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de niobio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.....	56
Tabla 43. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de silicio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.....	57
Tabla 44. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de zinc con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.....	59
Tabla 45. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de circonio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.....	60
Tabla 46. Costos asociados a la limpieza física.	62
Tabla 47. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de cobre con la técnica de limpieza química.....	63
Tabla 48. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de niobio con la técnica de limpieza química.	65
Tabla 49. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de silicio.	67
Tabla 50. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de zinc.....	69
Tabla 51. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de circonio.....	71
Tabla 52. Costo limpieza ácido clorhídrico.	73
Tabla 53. Costo limpieza ácido nítrico.....	73
Tabla 54. Tabla de constantes de control de calidad para las gráficas de medias.	79

Lista de Gráficas

Gráfico 1. Gráfica de medias para el cobre con las tres técnicas de limpieza.	50
Gráfico 2. Gráfica de medias para el niobio con las tres técnicas de limpieza.	50
Gráfico 3. Gráfica de medias para el silicio con las tres técnicas de limpieza.	51
Gráfico 4. Gráfica de medias para el zinc con las tres técnicas de limpieza.	51
Gráfico 5. Gráfica de medias para el circonio con las tres técnicas de limpieza.	52
Gráfico 6. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito pulidos.	55
Gráfico 7. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito pulidos.	57
Gráfico 8. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito pulidos.	58
Gráfico 9. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito pulidos.	60
Gráfico 10. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito pulidos.	61
Gráfico 11. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.	64
Gráfico 12. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.	64
Gráfico 13. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.	66
Gráfico 14. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.	66
Gráfico 15. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.	68
Gráfico 16. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.	68
Gráfico 17. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.	70
Gráfico 18. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.	70
Gráfico 19. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.	72
Gráfico 20. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.	72

RESUMEN

Se redujeron los costos operativos en el análisis químico de minerales mediante la reutilización de crisoles de grafito. La investigación se centró en determinar la técnica de limpieza más eficiente y rentable para eliminar los remanentes de cobre, niobio, silicio, zinc y circonio en crisoles usados en procedimientos de análisis químico de minerales por fusión con metaborato de litio. Se evaluaron dos técnicas principales: la limpieza química, utilizando ácido clorhídrico al 20% (v/v) y ácido nítrico al 20% (v/v), y la limpieza física mediante el pulido abrasivo del interior de los crisoles. Los resultados del estudio revelaron que la limpieza química con ácido clorhídrico fue más efectiva que con ácido nítrico, se comprobó que el ácido clorhídrico presentó una diferencia porcentual de concentración de analitos menor en un 0.19% hasta un 3.24% respecto al ácido nítrico. En cuanto a la técnica de limpieza física, se concluyó que fue la mejor técnica de limpieza en comparación a la técnica de limpieza química presentando una diferencia mínima pero considerable en la concentración de analitos con un menor rango porcentual de 0.01% a 0.15% frente al ácido clorhídrico, y de 0.21% a 3.68% frente al ácido nítrico.

El análisis económico evidenció que la limpieza química con ácido clorhídrico fue menos costosa (\$6.54) que con ácido nítrico (\$7.00). Sin embargo, la limpieza física mediante el pulido presentó el costo más bajo (\$3.34). Todas las técnicas evaluadas presentaron una reducción de costos significativo en comparación con la compra de crisoles nuevos, cuyo costo ascendía a \$8.00.

Palabras clave

Limpieza de crisoles de grafito / Análisis de costo-beneficio / Control estadístico de calidad / Análisis químico de minerales

ABSTRACT

Reduced operating costs in mineral chemical analysis by reusing graphite crucibles. The research focused on determining the most efficient and cost-effective cleaning technique to remove remaining copper, niobium, silicon, zinc and zirconium from crucibles used in lithium metaborate fusion chemical mineral analysis procedures. Two main techniques were evaluated: chemical cleaning, using 20% (v/v) hydrochloric acid and 20% (v/v) nitric acid, and physical cleaning by abrasive polishing of the inside of the crucibles. The results of the study revealed that chemical cleaning with hydrochloric acid was more effective than with nitric acid; it was found that hydrochloric acid presented a percentage difference in analyte concentration lower by 0.19% to 3.24% with respect to nitric acid. As for the physical cleaning technique, it was concluded that it was the best cleaning technique compared to the chemical cleaning technique, presenting a minimal but considerable difference in the concentration of analytes with a lower percentage range of 0.01% to 0.15% compared to hydrochloric acid, and from 0.21% to 3.68% compared to nitric acid.

The economic analysis showed that chemical cleaning with hydrochloric acid was less expensive (\$6.54) than with nitric acid (\$7.00). However, physical cleaning by polishing presented the lowest cost (\$3.34). All the techniques evaluated showed a significant cost reduction compared to the purchase of new crucibles, which cost \$8.00.

Keywords

Cleaning of graphite crucibles / Cost-benefit analysis / Statistical quality control / Chemical analysis of minerals

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de transición energética global, la demanda y el papel estratégico de elementos químicos como el cinc, silicio y circonio están adquiriendo una importancia cada vez mayor. Estos elementos no solo son fundamentales en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas, sino que también desempeñan un rol crucial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y eficientes. La competencia por asegurar el suministro de estos minerales se intensifica a medida que aumenta la demanda global, impulsada por la transición hacia energías renovables y la necesidad de soluciones tecnológicas más eficientes y sostenibles. Países como China, Estados Unidos, Australia, Brasil y Perú, se posicionan como importantes productores y proveedores de estos recursos, mientras que empresas multinacionales invierten en investigación y desarrollo para optimizar sus procesos de extracción y mejorar la eficiencia en el uso de estos elementos.

La exploración geoquímica juega un papel crucial al proporcionar información precisa sobre la presencia, distribución y viabilidad económica de los depósitos minerales. Esta etapa inicial no solo determina la rentabilidad potencial de un proyecto, sino que también influye significativamente en su impacto ambiental y social.

Es así que la fusión de minerales emerge como un método analítico crucial para cuantificar con precisión la concentración de estos elementos en las muestras geológicas de exploración geoquímica. La fusión de minerales es un proceso que permite separar los componentes de una muestra mineral mediante la aplicación de calor intenso, generalmente con un flujo controlado de gas o aire, lo que facilita la extracción de metales y minerales en forma pura o concentrada.

En este contexto, el manejo estratégico y rentable de recursos en los análisis de fusión

se presenta como un reto importante para una empresa dedicada al análisis de minerales de naturaleza geoquímica. Es así que en este estudio se pretende hacer frente a dicho reto en una empresa dedicada al análisis químico de minerales de geo exploración minera en Lima – Perú y se evaluará el impacto de la implementación de técnicas de limpieza física y química de crisoles de grafito en los costos de operación y se establecerá una técnica estándar de limpieza de crisoles de grafito en el análisis de minerales en el sector de servicios geoquímicos para reducir costos de operación y rentabilizar mejor los servicios de análisis de minerales.

I. Información Del Lugar Donde Se Desarrolló La Actividad

El proyecto de suficiencia profesional se llevó a cabo en una empresa ubicada en Lima, Perú con una red de laboratorios comerciales, móviles y en minas que ofrece servicios especializados en análisis de materiales geológicos, ensayos y verificaciones de recursos naturales geoquímicos que incluyen metales preciosos, básicos y de tierras raras.

La duración del proyecto fue de un total de 4 meses, comprendiendo las etapas de investigación, experimentación y análisis de resultados.

II. Planteamiento Del Problema

2.1. Descripción del problema

En una empresa de análisis de minerales de geo exploración, un nuevo método de análisis químico por fusión generó un aumento significativo en los costos operativos debido al uso desechable de crisoles de grafito. Estos crisoles, necesarios para la determinación de elementos químicos en las muestras, eran desechados después de cada uso, lo que incrementó considerablemente el costo de operación, afectando la eficiencia en el manejo de recursos.

Ante esta situación, surge el problema de investigación:

Problema principal

¿Cómo se puede reducir el costo operativo en una empresa de análisis de minerales mediante la reutilización de crisoles de grafito empleados en los ensayos por fusión, sin comprometer la calidad de los resultados analíticos?

Este problema central genera una serie de interrogantes secundarias que deben ser abordadas para resolver el planteamiento principal.

Problemas secundarios

Entre una limpieza química y una limpieza física ¿Cuál es la técnica de limpieza más efectiva para limpiar los crisoles de grafito que no comprometa la calidad de los resultados que se deriven de su reutilización en análisis químico?

¿Cuál es el impacto económico de implementar la reutilización de crisoles de grafito en la operación diaria de la empresa?

Responder a estas preguntas permitirá establecer una estrategia efectiva para reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia en la empresa, promoviendo además un modelo de economía circular en sus operaciones.

2.2. Justificación

En una empresa dedicada al análisis de minerales de geoexploración, durante la implementación de un nuevo método de análisis químico por fusión para la determinación de elementos en muestras minerales, se identificó un alto costo operativo debido al precio de los crisoles de grafito requeridos por el proceso. Los crisoles de grafito luego de utilizarse en el proceso de análisis se desechaban, lo que ocasionaba un mayor costo. Los procesos afectados fueron los que utilizaban este tipo de material para los ensayos, incluyendo el análisis instrumental de las muestras procesadas previamente en el material en cuestión.

En otros métodos internos de análisis por fusión realizados con crisoles de circonio, en la sala de lavado de materiales y digestión el lavado del material era realizado por el auxiliar-analista o analista; como etapa final de un método de fusión realizado.

Después del uso, el analista ejecutaba el procedimiento de lavado que aplicaba tanto para crisoles de circonio como de platino, según la metodología interna de la empresa se limpiaba manteniéndolo en una solución de ácido clorhídrico del 10% v/v al 20% v/v. .

Sin embargo; no se había establecido una técnica de limpieza de crisoles de grafito debido a su reciente adquisición por requerimiento de un nuevo método implementado, por ende, tampoco se había establecido la concentración óptima de ácido clorhídrico que garantice una correcta limpieza del crisol.

De igual forma, no se contaba con un estudio del efecto de otros reactivos químicos como ácido nítrico para lograr la mayor efectividad de agentes químicos sobre la limpieza de los crisoles. Es debido a ello, que se contempló la idea de reutilizarlos mediante una limpieza del material vía una técnica química o física.

Este trabajo de suficiencia profesional fomentó la implementación de una economía circular como nuevo modelo de proceso operativo en la empresa al reciclarse insumos que antes

se desechaban.

Además, el proyecto impactó positivamente en la rentabilidad de la empresa donde se realizó, ya que se estableció una técnica de limpieza para crisoles de grafito que garantizaba la calidad de resultados y a su vez permitía reducir los costos de operación detallados a continuación.

En el análisis químico de minerales como operación de la empresa, se utilizan crisoles de grafito. El costo de crisoles de grafito por unidad es de \$8.0 (data obtenida de los proveedores), dichos crisoles luego de efectuado el análisis químico se procedían a desechar. Es decir, antes de desarrollar esta investigación, la empresa usaba un crisol de grafito por cada muestra analizada. Para darnos una idea del costo involucrado se sabe lo siguiente; en la empresa se analizan alrededor de 70 muestras por turno, cada día operativo cuenta con 3 turnos, siendo 210 muestras analizadas diariamente. Lo que involucraría un costo de operación de \$ 1 680.0, dicho costo se vio reducido al reutilizar los crisoles de grafito.

2.3. Finalidad y objetivos de la actividad

El objetivo de la investigación es establecer una técnica óptima para la limpieza de crisoles de grafito con el fin de reducir los costos de operación en el análisis químico para la determinación y cuantificación de elementos químicos y trazas en minerales.

Para lograrlo, se establecen los siguientes objetivos:

Objetivo General

Reducir los costos operativos en la empresa de análisis de minerales mediante la implementación de una técnica efectiva para la reutilización de crisoles de grafito, sin comprometer la calidad de los resultados analíticos.

Objetivos Específicos

Identificar y comparar la efectividad de las técnicas de limpieza física y química para

los crisoles de grafito, evaluando su impacto en la calidad de los resultados analíticos obtenidos tras su reutilización.

Determinar el impacto económico de la reutilización de crisoles de grafito en la operación diaria de la empresa, identificando la técnica de limpieza que genere la mayor rentabilidad en términos de reducción de costos operativos.

III. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

Rojas Villacís & Zúñiga Arrobo. (2020)

Su artículo “ Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Nambija” se centra en comprender cómo estos costos afectan la sostenibilidad económica y ambiental de las operaciones mineras en una zona reconocida por su actividad aurífera, analizan diversos componentes de los costos operativos, entre los que se incluyen los costos de mano de obra, insumos, equipo, mantenimiento, y otros gastos indirectos asociados a la extracción de minerales. Se enfatiza la importancia de la eficiencia en la gestión de estos costos para asegurar la rentabilidad de las operaciones mineras. El estudio revela que, debido a la naturaleza rudimentaria de muchas prácticas empleadas en la minería artesanal, los costos operativos tienden a ser altos, lo que reduce significativamente las ganancias netas.

El estudio concluye con recomendaciones dirigidas a mejorar la eficiencia operativa, incluyendo la capacitación de los mineros en el uso de tecnologías más limpias y la promoción de prácticas de minería responsable. Los autores sugieren que una mejor comprensión de los costos operativos puede conducir a la implementación de estrategias más efectivas para mejorar la competitividad de la minería a pequeña escala y artesanal en Nambija, lo que, a su vez, podría contribuir al desarrollo económico de la región sin comprometer el medio ambiente.

Cayulef Rojas (2016)

El trabajo de titulación de Evelyn “Determinación de costos para análisis de elementos de interés en muestras minerales”, se enfoca en la determinación de los costos asociados a los análisis de elementos de interés en muestras minerales en el laboratorio químico de la faena Cabildo, perteneciente a Minera Las Cenizas. Esta faena procesa principalmente minerales sulfurados de cobre y realiza análisis de control de calidad para determinar las concentraciones

de diversos elementos como cobre total y soluble, plata, oro, zinc, plomo, hierro, cadmio y óxido de calcio.

El trabajo tiene como objetivo principal determinar los costos de estos análisis durante el año 2016, abarcando recursos humanos, materiales, reactivos, equipos y elementos de protección personal. Los objetivos específicos incluyen la caracterización de los minerales sulfurados de cobre, el análisis del uso de reactivos y procedimientos según el origen de la muestra, y la cuantificación de los costos asociados a cada procedimiento. Finalmente, se analizan los costos por cliente, proporcionando una visión detallada del gasto en control de calidad en la faena Cabildo y destacando la importancia de estos análisis en la operación minera.

Sadlapurkar et al. (2022)

En su investigación "Development of new efficient and cost effective liquid-liquid extractive determination method for cobalt(II): Analysis of water, alloys and nano powder" se estudia el desarrollo de un nuevo método de determinación extractiva líquido-líquido eficiente y rentable para la detección de cobalto(II). Se enfoca en la optimización de este método para lograr una mayor eficiencia y reducción de costos. El análisis se extiende a muestras de agua, aleaciones y nanopartículas en polvo. El énfasis principal está en mejorar la eficiencia del proceso de extracción líquido-líquido para una detección precisa y sensible del cobalto(II), lo que implica la optimización de parámetros clave para alcanzar resultados óptimos en términos de sensibilidad, precisión y costo.

Di Maria et al. (2022)

En su estudio "Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis" examina la eficiencia energética y de recursos en la recuperación de residuos metalúrgicos mediante un análisis ambiental y

económico. Los autores utilizan un enfoque de análisis de costos para evaluar esta eficiencia, considerando tanto los aspectos ambientales como los económicos. El objetivo es entender mejor cómo se pueden optimizar los procesos de recuperación de residuos metalúrgicos desde una perspectiva tanto ambiental como económica.

Roy et al. (2022)

En su "Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis" se estudia la viabilidad económica de los aeradores en la acuicultura, utilizando un enfoque de Costeo del Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés). El análisis se enfoca en evaluar los costos por actividad y la rentabilidad asociada con el uso de estos dispositivos en la acuicultura. El objetivo es entender cómo los aeradores afectan los costos operativos y la rentabilidad general de las operaciones acuícolas, proporcionando una visión detallada de su impacto económico.

Yu et al. (2023)

En su artículo "Techno-economic analysis of residential building heating strategies for cost-effective upgrades in European cities" se evalúan estrategias de calefacción para edificios residenciales en ciudades europeas desde una perspectiva tecnológica y económica.

Examinan diferentes enfoques de calefacción y realizan un análisis detallado de los costos asociados con cada estrategia.

El análisis tecnoeconómico realizado por Yu et al. incluye la evaluación de varios indicadores financieros, como el período de retorno de la inversión (ROI), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Estos indicadores permiten determinar la viabilidad económica de las diferentes estrategias de calefacción en función de los costos operativos y los ahorros de energía esperados a lo largo del tiempo.

Además de los aspectos económicos, el estudio también considera los beneficios

ambientales asociados con la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto proporciona un análisis integral que no solo se centra en la rentabilidad financiera a corto plazo, sino también en los impactos a largo plazo en términos de sostenibilidad y cambio climático.

3.2. Marco Teórico

El presente estudio pretende realizar un análisis de costos entre dos técnicas de limpieza con el fin de establecer cuál es el óptimo para la empresa; por consiguiente, es menester dilucidar sustancialmente el conocimiento de las teorías y principios que permitan comprender en qué se basan y cómo abordarlas de manera analítica y operativa para desarrollar los objetivos trazados.

En ese sentido, a continuación, se enuncia la síntesis de cada uno de los principios y sistemas de costos a tratar:

3.2.1. Procedimiento de limpieza de crisoles de grafito para análisis de elementos trazas

La limpieza adecuada de crisoles de grafito es crucial para asegurar la precisión y fiabilidad de los análisis químicos, especialmente en la determinación de elementos traza en muestras minerales. Según lo descrito por Hunter et al. (1992), el procedimiento estándar para la limpieza de crisoles de grafito de alta pureza se detalla a continuación:

Se utilizan crisoles de grafito de alta pureza, ácido nítrico diluido (10% v/v), agua destilada, guantes de protección, gafas de seguridad y toallas o paños limpios y se siguen las siguientes etapas:

- 3.2.1.1. **Preparación Inicial.** Antes de comenzar cualquier procedimiento, se verifica visualmente que los crisoles estén limpios y libres de residuos visibles. Todos los trabajos se realizan en una campana de ventilación para garantizar la

seguridad del operador.

3.2.1.2. Limpieza con Ácido Nítrico. Se prepara una solución de ácido nítrico diluido al 10% v/v mezclando 10 mL de ácido nítrico concentrado en 90 mL de agua destilada. Los crisoles se sumergen completamente en esta solución y se dejan en remojo durante un período de 1 hora para disolver cualquier residuo o contaminante superficial.

3.2.1.3. Enjuague con Agua Destilada. Después del remojo en ácido nítrico, se retiran los crisoles y se enjuagan meticulosamente con agua destilada para eliminar cualquier residuo de ácido. Este proceso de enjuague se repite dos veces para asegurar la eliminación completa de cualquier contaminante residual.

3.2.1.4. Secado. Los crisoles se secan cuidadosamente con toallas o paños limpios hasta que estén completamente libres de humedad.

3.2.1.5. Inspección Final. Antes de utilizar los crisoles en análisis, se realiza una inspección visual minuciosa para confirmar que estén limpios y libres de contaminantes visibles.

Es esencial mantener registros detallados de los procedimientos de limpieza utilizados, incluyendo la concentración exacta de ácido nítrico y los tiempos de remojo, para garantizar la reproducibilidad y consistencia de los análisis químicos. La implementación rigurosa de este procedimiento asegura que los crisoles estén preparados adecuadamente para análisis sensibles de elementos traza, minimizando la posibilidad de contaminación cruzada y optimizando la precisión de los resultados.

3.2.2. Punto de fusión

Se define el punto de fusión normal como una propiedad intensiva que tal como afirma Barbisan (2022) para determinado material es la temperatura en la que la fase líquida y la fase

sólida se encuentran en equilibrio a una presión atmosférica de 101.3 kPa, de ahí que se le denomine, punto de fusión normal. Es una propiedad independiente de la cantidad de materia involucrada y caracteriza sólidos cristalinos permitiendo identificar su grado de pureza y calidad. Sus valores para cada material se encuentran tabulados. Por ejemplo, para el grafito se tiene un valor de 3.925 °C

3.2.3. Fusión con Metaborato de Litio

Según lo descrito por García-Alonso et al. se tienen los siguientes principios relacionados a la fusión con metaborato de litio. La fusión con metaborato de litio se utiliza para disolver eficientemente muestras minerales complejas. Esta técnica permite homogeneizar la muestra y facilita la liberación de elementos de interés para su posterior análisis por técnicas analíticas como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Durante la fusión, el metaborato de litio actúa como fundente alcalino que reacciona con los componentes minerales de la muestra. Esta reacción química disuelve los componentes de la muestra en una fase vítrea, que es más fácil de manejar y analizar.

3.2.3.1. Química de la Disolución de Elementos en Metaborato de Litio.

Aspectos químicos involucrados en la disolución de elementos durante la fusión con metaborato de litio.

Interacción metaborato de litio-mineral. El metaborato de litio reacciona con los componentes minerales de la muestra, rompiendo los enlaces químicos y solubilizando los elementos en la fase líquida fundida. Esta interacción depende del pH y la temperatura del medio de fusión, así como de la composición mineralógica de la muestra.

Factores que afectan la disolución. El pH ácido del metaborato de litio facilita la disolución de minerales silicatados y oxídicos, mientras que la temperatura

controla la velocidad de reacción. La composición mineralógica, incluyendo la presencia de minerales refractarios, afecta la eficiencia y completitud de la disolución.

3.2.4. Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

Es una técnica analítica complementaria a la fusión con metaborato de litio. La espectrometría de masas con ICP-MS permite la detección y cuantificación precisa de elementos traza en soluciones líquidas derivadas de muestras fundidas con metaborato de litio. El plasma acoplado inductivamente ioniza los elementos en la muestra y el espectrómetro de masas separa y detecta los iones de diferentes masas atómicas.

Dentro de las ventajas de ICP-MS después de la fusión con metaborato de litio: ICP-MS se tiene que ofrece alta sensibilidad, precisión y capacidad de multi-elemento esto permite el análisis simultáneo de múltiples elementos.

3.2.5. Control estadístico de la calidad

Esta técnica cuantitativa y gráfica según Pierdant y Rodríguez (2009) permite verificar que la calidad de un servicio se encuentre dentro de los parámetros estándares establecidos por la empresa que brinda el servicio. El mecanismo de control de calidad involucra el manejo de dos gráficas mencionadas a continuación.

3.2.5.1. Análisis de blancos. En el análisis químico, especialmente en técnicas sensibles y precisas como la espectroscopia, la cromatografía, y otras técnicas analíticas, se realiza un análisis de blancos como parte del control de calidad por varias razones fundamentales:

Detección de Contaminaciones. Según la perspectiva de Robinson, K. A. (2005) El análisis de blancos ayuda a detectar y cuantificar cualquier contaminación que pueda provenir de los reactivos, los materiales de laboratorio, el equipo de

medición, o incluso del ambiente. Estas contaminaciones pueden introducir falsos positivos o afectar la precisión de las mediciones.

Estimación de Fondo Basal. En el campo de la química analítica, incluyendo la determinación y gestión del fondo basal en técnicas analíticas sensibles Jennings, W. G. (1998) menciona que esta estimación permite establecer el nivel de señal de fondo o ruido que puede presentarse en ausencia de la muestra. Esto es crucial para determinar el límite de detección y la sensibilidad del método analítico utilizado.

Corrección de Señal. Dentro de los métodos y técnicas para corregir señales de fondo y mejorar la precisión de las mediciones analíticas, estudiosos como Burns, T. G. (2002) sostienen que, en muchas técnicas analíticas, especialmente aquellas que detectan señales muy débiles o concentraciones muy bajas, es esencial restar la señal del blanco del resultado obtenido con la muestra real para obtener un valor preciso de la concentración o del componente analizado.

Validación del Procedimiento Analítico. Para asegurar la precisión y la fiabilidad de los resultados en análisis químico la validación de métodos analíticos representa un valor importante y tal como menciona Barns, R. M. (2008) El análisis de blancos forma parte de los requisitos para la validación de métodos analíticos según normativas y estándares internacionales (como ISO, ASTM, entre otros). Ayuda a demostrar la especificidad y la precisión del método analítico utilizado.

Control de Calidad Interno. Se establecen y ejecutan medidas internas de control de calidad con el fin de asegurar que los resultados analíticos sean precisos y confiables y como Skoog, D. A. (1996) menciona, sirve como parte del sistema de control de calidad interno en laboratorios, garantizando que las mediciones sean consistentes y confiables a lo largo del tiempo. Además así se logra identificar

cualquier variación o problema en el proceso analítico.

Los blancos de análisis pueden ser de diferente tipos, y siguiendo los estudios de Sawyer, D. T. (2001) se diferencian de la siguiente manera:

Blanco de Reactivo. Utilizado para evaluar la pureza del reactivo químico utilizado en la preparación de soluciones o en el análisis mismo.

Blanco de Proceso. Se refiere a muestras que imitan las condiciones de procesamiento o manipulación de la muestra real, pero sin el analito de interés. Ayuda a detectar contaminaciones durante el manejo de muestras.

Blanco de Campo. Se toma in situ y representa el fondo natural del entorno en el que se realiza el muestreo, como suelos, aguas o aire.

3.2.6. Análisis de costos

El análisis de costos según Horngren et al. (2012) es el estudio de los costos asociados a la utilización de recursos para lograr un determinado objetivo y se cuantifica en unidades monetarias.

3.2.6.1. **Clasificación.** La suma de los costos involucrados acumula los datos respecto a los costos organizados en categorías. De manera que los costos se organizan y se clasifican de acuerdo a su naturaleza en costos directos y costos indirectos.

Costos directos. Son los costos que se atribuyen al objeto de costo debido a que se relacionan con ellos, se consideran costos atribuibles debido a su asignación directa a dicho objeto. Por ejemplo, el costo de los materiales necesarios para su desarrollo y/o fabricación.

Costos indirectos. Son los costos que se relacionan con el objeto de costo, pero que no se le puede atribuir desde una perspectiva económica. Por ejemplo, los

costos administrativos para producir dicho objeto de costo, los costos anuales de arrendamiento de planta de producción o el consumo de la energía solo para la planta.

La manera en que se comportan los costos, también determina su clasificación, representan la manera en que los recursos se utilizan para generar productos o servicios. De ellos, se identifican dos patrones de comportamiento relacionados a una actividad y un tiempo determinados.

Costos variables. Es el costo que puede verse afectado proporcionalmente por el volumen o el nivel de actividad.

Costos fijos. Es el costo que mantiene su estabilidad en un tiempo definido, pese a los cambios de volumen o de nivel de actividad.

3.2.6.2. **Costo por procesos.** Se utiliza este modelo de costo en empresas que producen unidades de producto con características idénticas, generalmente en empresas de procesamiento de sustancias químicas. En este modelo se evalúa la cantidad final de unidades producidas, las etapas o procesos que terminan las unidades producidas y los costos asignados a dichas unidades.

3.2.6.3. **Costo por uso.** El costo por uso está determinado por su costo inicial en relación a la cantidad de veces que se utiliza determinado recurso. Viene dado por la siguiente fórmula.

$$\text{Costo por uso} = \frac{\text{Costo Inicial}}{\text{Vida útil en usos}} \quad (1)$$

Este costo también puede calcularse por el número de usos anuales, obteniéndose el costo anual asociado al uso de determinado recurso.

$$\text{Costo anual por uso} = \text{Costo por uso} \times \text{Número de usos por año} \quad (2)$$

3.2.6.4. **Costo por depreciación.** El costo por depreciación se les asigna a los

activos fijos en proporción a su consumo en un periodo mensual o anual. Se refiere a la disminución real del valor del recurso, ya que su valor se refiere a la asignación del precio inicial de un recurso durante un tiempo establecido.

$$\text{Costo de depreciación anual} = \frac{\text{Costo inicial} - \text{Valor de rescate}}{\text{Vida útil (años)}} \quad (3)$$

El valor de rescate es el valor residual esperado al final de la vida útil del activo. Es decir, es el valor contable que se podría obtener al final de la vida útil de un recurso, del activo que ya cumplió con su vida útil. En esta investigación tomaremos como valor referencia el dado por Rojas y Zúñiga (2020) quienes asignan en análisis de costos en minería el valor de rescate como un porcentaje equivalente al 20% del costo inicial del recurso.

Para expresar el costo en términos de su valor total a lo largo de la vida útil del equipo se multiplica el costo anual por la vida útil en años.

$$\text{Costo de depreciación total} = \text{Costo de depreciación anual} \times \text{Vida útil (años)} \quad (4)$$

Para expresar el costo de depreciación total acorde a la duración específica del proyecto se utiliza un factor de conversión basado en el tiempo real involucrado en el proyecto.

$$\text{Factor de tiempo} = \frac{\text{Minutos del proyecto}}{525\,600_{\text{min/año}}} \quad (5)$$

El costo de depreciación respecto al periodo específico del proyecto es el siguiente.

$$\text{Costo depreciación en el proyecto} = \text{Costo de depreciación total} \times \text{Factor de tiempo} \quad (6)$$

3.2.6.5. **Costo energía.** El costo de energía utilizada se mide generalmente en

kilovatios/hora (kW/h) y depende de la potencia del equipo y del tiempo que se utiliza.

$$\text{Energía consumida (kWh)} = \text{Potencia equipo (kW)} \times \text{Tiempo (h)} \quad (7)$$

El costo de consumo eléctrico se calcula del producto del costo de energía consumida por el tiempo consumido por el costo de la energía eléctrica per se.

$$\text{Costo consumo eléctrico} = \text{Energía consumida (kWh)} \times \text{Costo eléctrico (\$/kWh)} \quad (8)$$

3.2.6.6. Costo de mantenimiento de equipos. El cálculo de costos por mantenimiento brinda el costo asignado al mantenimiento asociado al equipo. El mantenimiento preventivo incluye actividades como la inspección, ajuste, limpieza, calibración y reemplazo de repuestos desgastados del equipo.

$$\text{Costo de Mantenimiento Preventivo} = \text{Costo de repuestos} + \text{Costo humano} + \text{Costo inactividad} \quad (9)$$

El costo humano involucra el costo del personal encargado de realizar el mantenimiento al equipo.

El costo de inactividad es el costo ocasionado por la parada del equipo debido a su mantenimiento. Se calcula como la suma del costo de ganancia producida por hora, el pago al personal humano al que se le sigue pagando, respecto al tiempo de parada.

El costo de mantenimiento anual se calcula multiplicando el costo de mantenimiento por el número de veces en que se realiza la actividad al año.

$$\text{Costo de Mantenimiento Preventivo anual} = \text{Costo de Mantenimiento Preventivo} \times \text{Frecuencia anual} \quad (10)$$

El costo de mantenimiento preventivo respecto al tiempo específico del proyecto

se determinará multiplicando el costo de mantenimiento preventivo anual por el factor de tiempo dado en la ecuación 5.

$$\text{Costo de Mantenimiento Preventivo proyecto} = \frac{\text{Costo de Mantenimiento Preventivo anual}}{\text{Factor de tiempo}} \quad (11)$$

3.2.6.7. **Costo recursos humanos.** Es el costo que se le atribuye al personal encargado directamente con la operación de producción. Se calcula multiplicando el costo del salario por el tiempo involucrado en el proceso.

3.2.7. *Crisol*

Los crisoles son materiales de laboratorio utilizados en análisis químico a altas temperaturas. Son pequeños recipientes de naturaleza refractaria para calentar, fundir, incinerar o calcinar en su interior. Algunas de sus principales características son conductividad térmica, resistencia a la compresión y porosidad.

3.2.7.1. **Crisoles de grafito.** Según Hendawi et al. (2024). Los crisoles de grafito son ampliamente utilizados en aplicaciones de alta temperatura debido a sus propiedades refractarias, que incluyen bajo coeficiente de expansión térmica, alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico. Estos crisoles son especialmente adecuados para la fundición y refinado de metales, así como para la fusión y cristalización del silicio.

Figura 1. Crisol de grafito.



<https://eaglecarbonsolutions.com/graphite-crucible/>

Aunque los crisoles de grafito pueden reutilizarse por su alta resistencia al choque térmico, la interacción entre el carbono y el silicio limita su reutilización al fusionarlo.

Esta interacción puede provocar grietas y disolución de carbono en el silicio fundido, lo que afecta la calidad del producto final. Se ha sugerido que el recubrimiento del crisol con materiales como SiC (carburo de silicio) puede mitigar estos problemas, permitiendo la reutilización del crisol y garantizando la pureza del silicio resultante. Sin embargo, la selección adecuada del recubrimiento es crucial y debe tenerse en cuenta una serie de consideraciones antes de su aplicación. (p. 6)

IV. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.1. Establecimiento de una metodología de limpieza de crisoles de grafito

En la empresa aún no se había desarrollado una técnica específica para limpiar los crisoles de grafito debido a que estos fueron adquiridos recientemente según los requisitos del nuevo método implementado. Por lo tanto, tampoco se había determinado la concentración ideal de ácido clorhídrico que asegurara una limpieza adecuada de los crisoles (se solía utilizar ácido clorhídrico para lavar crisoles de otros materiales utilizados en otros análisis químicos).

Además, no se había realizado un estudio sobre el efecto de otros reactivos químicos como el ácido nítrico para evaluar cuál de ellos podría ser más efectivo en la limpieza de los crisoles. Por lo que establecer una metodología de limpieza de crisoles de grafito fue el primer reto a abordar.

Para abordar este problema, se estableció una nueva metodología de limpieza de crisoles. La limpieza química se realizó con soluciones al 20% de ácido clorhídrico y 20% de ácido nítrico en agua ultrapura para comparar la mejor efectividad entre ellos dos. Se determinó dicha concentración duplicando la concentración sugerida según los estudios previos descritos por Hunter et al. (1992). La selección de agua ultrapura se realizó en base a la técnica de lectura instrumental utilizada, ya que como menciona Houk et al., (1980) el agua ultrapura minimiza contaminación por metales traza, reduce el ruido de fondo, así como las interferencias espectrales y químicas.

Asimismo, teniendo en cuenta la investigación de Suslick, K. S., (1991) se realizó el estudio de diversas técnicas de limpieza de crisoles de grafito en aplicaciones analíticas y científicas, entre ellas, una en especial, el procedimiento del pulido de crisoles como un método de limpieza físico de los crisoles de grafito.

4.2. Verificación de la efectividad de la técnica de limpieza de crisoles de grafito empleada

Se realizó un análisis estadístico de la calidad en crisoles de grafito tratados con una técnica de limpieza física y una técnica de limpieza química. Se comprobó la eficacia de ambas técnicas de limpieza mediante gráficas de medias estableciendo los límites de control de cada analito por cada técnica de limpieza y se verificó que se encontraran dentro de los límites de detección de la concentración por elemento químico permisibles por la empresa.

4.3. Reducción de costos de operación

Luego de la verificación de la efectividad de la técnica, se evaluaron los costos de operación realizados mediante un análisis de costos por proceso, teniendo en cuenta los costos asociados a cada costo implicado en cada técnica. Se comparó con el costo del proceso antes de la implementación del proyecto y se logró el objetivo de reducir los costos operativos en el análisis químico de minerales mediante la reutilización de crisoles de grafito.

V. PROCEDIMIENTO

El proyecto consistió de tres partes; a continuación, se muestra un diagrama de flujo con las etapas del proyecto realizado.

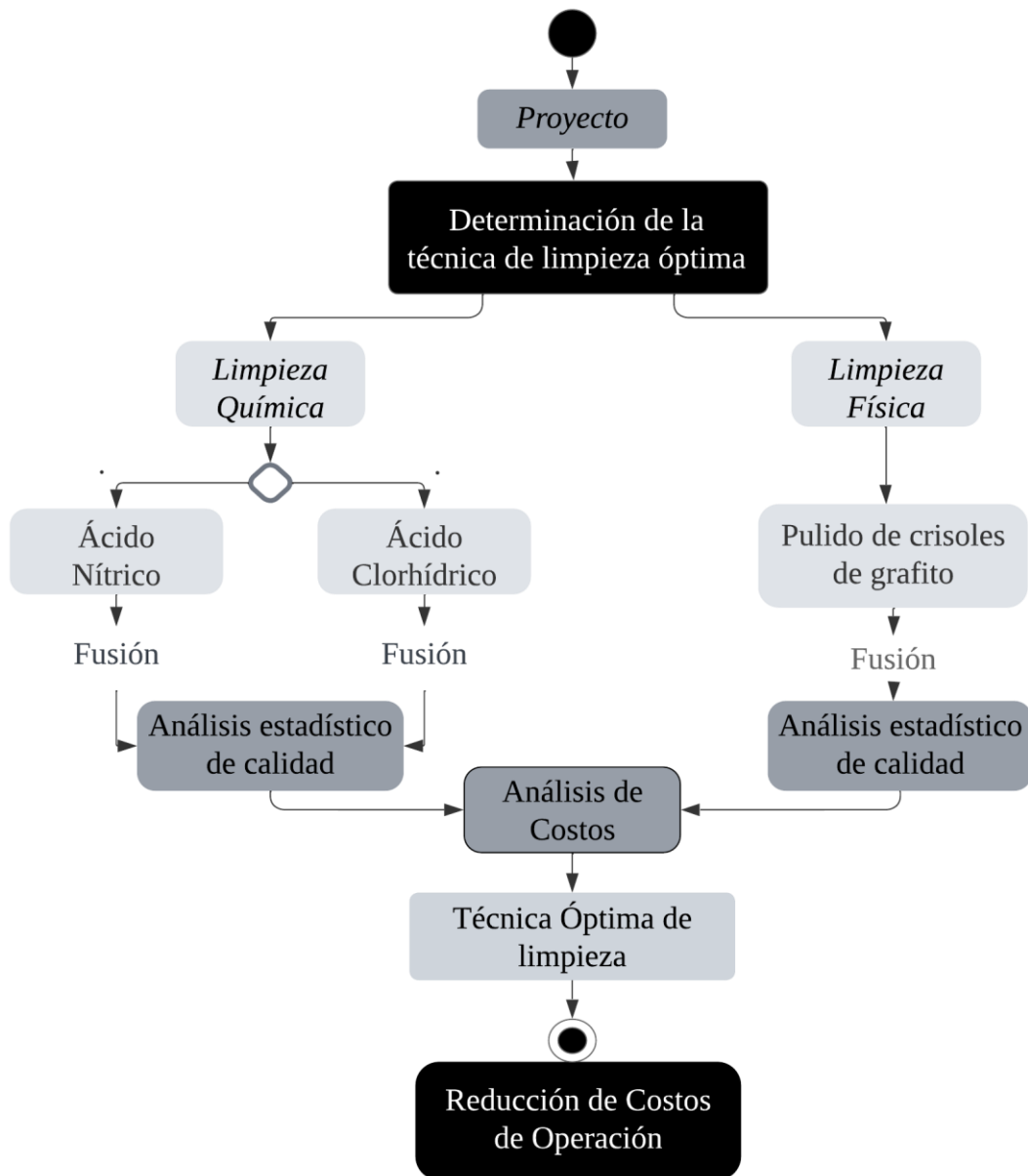


Figura 2. Diagrama de flujo del proyecto.

La primera parte comprendió la limpieza de los crisoles de grafito con ambas técnicas, física y química. En la segunda parte, se evaluó la calidad de la limpieza de los crisoles, para

lo cual se realizó un análisis estadístico de control de calidad por gráficas. En la tercera parte, se calculó el costo de cada técnica de limpieza empleado para lo cual se realizó un análisis de costos por proceso.

5.1. Limpieza de crisoles

La primera etapa del proyecto concerniente a la limpieza de crisoles se detallará a continuación.

5.1.1. Limpieza Física

La técnica de limpieza física de crisoles se realizó mediante el pulido del interior del crisol de grafito. El pulido de los crisoles implicó dos etapas. La primera etapa implicó diseñar un pulidor de crisoles, mientras que la segunda etapa fue el pulido de los crisoles de grafito per se.

Para el pulido de crisoles se debió hacer uso de un pulidor de crisoles preciso y maniobrable. Sin embargo; no se cuentan con ellos como tal en el mercado, por lo que se debió diseñar e implementar un pulidor de crisoles.



Figura 3. Pulidor de crisoles. a) Pulidor de crisoles de grafito. b) Base fija porta crisoles.

La implementación del pulidor de crisoles se realizó mediante el acondicionamiento de un taladro de 650W de potencia. Se cambió la broca del taladro por una broca pulidora y un disco pulidor. La tarea de pulir un crisol con un taladro modificado representaba riesgos al personal encargado de dicha tarea. Por lo que; el siguiente reto a resolver fue diseñar una base fija a una mesa que permita sostener el crisol de grafito mientras se realizaba el pulido de su interior con el taladro acondicionado.

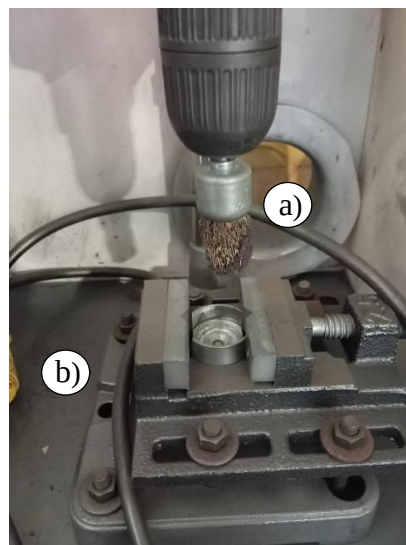


Figura 4. Pulidor de crisoles de grafito. a) Punta pulidora acondicionada. b) Base fija porta crisoles.

Para la segunda etapa el procedimiento del pulido de crisoles de grafito se realizó colocando el crisol de grafito en el porta crisoles y direccionando la punta del pulidor hacia el interior del crisol. El pulido de crisol se realizó hasta garantizar la eliminación por pulverización de la primera y más superficial capa del interior del crisol de grafito. El procedimiento de pulido de crisoles de grafito se llegó a optimizar hasta alcanzar un tiempo de 1.5 min por crisol.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la técnica de limpieza física.

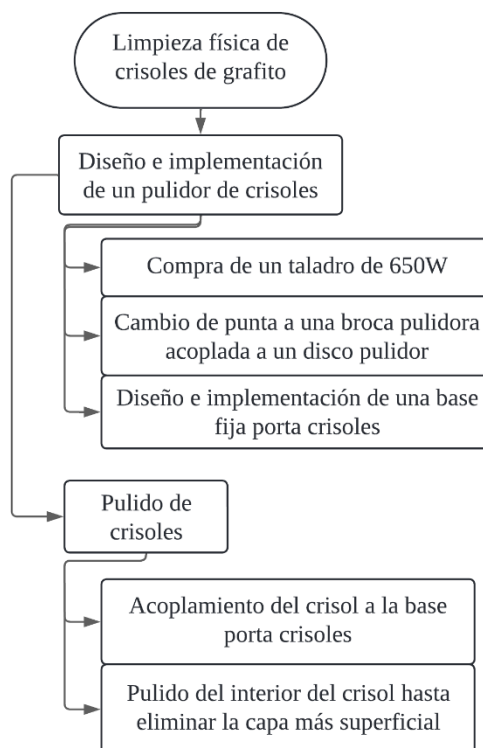


Figura 5. Diagrama de flujo de la técnica de limpieza física.

5.1.2. Limpieza Química

La limpieza de crisoles de grafito mediante la técnica química comprendió tres etapas. La primera consistió en el enjuague con agua ultra pura de los crisoles de grafito usados en análisis químicos por fusión anteriormente. La segunda etapa consistió en la limpieza de los crisoles con soluciones de ácido clorhídrico al 20% v/v y ácido nítrico al 20% v/v. Finalmente, la tercera etapa consistió en un enjuague final con agua ultra pura.

Haciendo uso de los equipos de protección personal respectivo a las tareas a realizar se realizaron las siguientes etapas.

Para la primera etapa se utilizó un envase de teflón con 0.5 litros de agua ultra pura en la que se sumergieron uno por uno los 54 crisoles de grafito que se estudiaron. Se repitió este

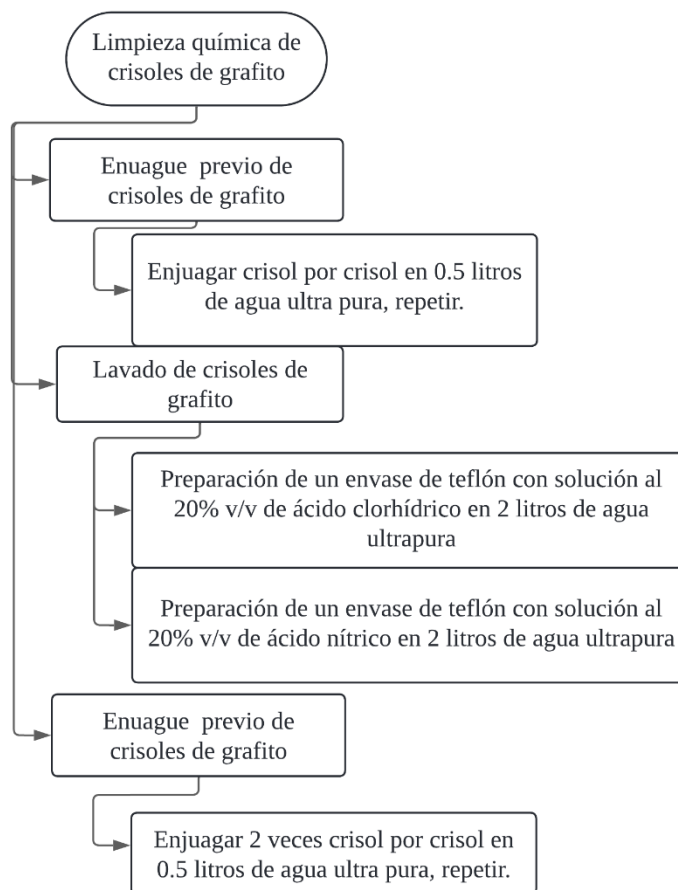


Figura 6. Diagrama de flujo de la técnica de limpieza química.

paso por segunda vez con una nueva cantidad de 0.5 litros de agua ultra pura en el envase.

En la segunda etapa, se preparó en un envase de teflón rotulado solución de ácido clorhídrico al 20% v/v en 2 litros y en un segundo envase de teflón rotulado se preparó una solución de ácido nítrico al 20% v/v en 2 litros. En cada uno de los envases se sumergieron 27 crisoles de grafito enjuagados previamente y se dejaron reposar durante 1 hora.

En la tercera etapa, se retiraron los crisoles de grafito de los envases de teflón en la etapa anterior y teniendo cuidado de no confundir los crisoles lavados con el ácido correspondiente, se sumergen en un nuevo envase de teflón con 0.5 litros de agua pura. Se repitió dos veces el mismo paso asegurándose de cambiar el agua ultra pura.

5.2. Análisis estadístico de control de calidad

Para evaluar la eficiencia de la limpieza de los crisoles, se desarrolló un análisis químico, el análisis químico empleado fue el análisis por fusión. La elección del tipo de análisis se realizó en base al método de análisis con el problema originalmente.

El proceso experimental implicó la fusión de muestras con metaborato de litio bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. Después de la fusión, la solución resultante se analizó por ICP-MS para cuantificar los elementos de minerales, óxidos y tierras raras presentes.

Las concentraciones obtenidas de cada uno de los analitos fueron sometidas a un análisis de control estadístico de la calidad con el fin de determinar los límites de control; es decir, los valores máximos y mínimos en los que se encuentra cada analito para así comprobar que cada analito se encuentre en un rango de lecturas menor o igual al valor del límite de detección de la empresa.

Este análisis es fundamental para determinar la efectividad de la técnica de limpieza utilizada, ya que una concentración de determinado analito cuyo valor sea menor o igual al valor del límite de detección de la empresa evidenciaría que la técnica de limpieza utilizada fue efectiva.

5.2.1. Limpieza física

Se le realizó un análisis de control de calidad a los crisoles de grafito pulidos según la técnica de limpieza física implementada.

5.2.1.1. **Análisis de blancos.** Este análisis se llevó a cabo empleando los crisoles pulidos; es decir, los crisoles tratados previamente con la técnica de limpieza física.

La manera en que se realizó el análisis de blancos fue la siguiente; se procedió

a realizar un análisis por fusión en los crisoles de grafito solo con el fundente de metaborato de litio según el procedimiento del método. Es decir; el análisis de un “blanco” sin muestra. Se hicieron 9 corridas en diferentes días con 3 crisoles cada corrida. Luego, un equipo de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) leyó los blancos para determinar el nivel de concentración de los elementos químicos de interés de la empresa encontrados en ellos (cobre, niobio, silicio, zinc y circonio). Una concentración mínima tolerable fijada por los límites del análisis involucraría una correcta limpieza del crisol de grafito, lográndose así evaluar la eficiencia de la técnica de limpieza utilizada.

Cobre (Cu)

Se tienen las concentraciones de cobre leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 1. Concentraciones de cobre en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.

<i>Límite detección 5 ppm Prueba</i>	<i>Cobre</i>		
	Crisoles pulidos		
	Concentración (ppm)		
1	3	2	3
2	2	4	4
3	3	5	4
4	4	2	5
5	2	4	5
6	3	4	4
7	4	5	2
8	3	5	5
9	3	3	4

Niobio (Nb)

Se tienen las concentraciones de niobio leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 2. Concentraciones de niobio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.

<i>Límite detección 10 ppm Prueba</i>	<i>Niobio</i>		
	Crisoles pulidos		
	Concentración (ppm)		
1	0	1	1
2	1	2	1
3	0	1	1
4	0	2	0
5	1	0	1
6	0	1	0
7	2	1	1
8	0	2	2
9	3	2	2

Silicio (Si)

Se tienen las concentraciones de silicio leídas con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 3. Concentraciones de silicio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.

<i>Límite detección 100 ppm Prueba</i>	<i>Silicio</i>		
	Crisoles pulidos		
	Concentración (ppm)		
1	15	18	20
2	21	25	24
3	23	21	25
4	25	22	24
5	33	24	27
6	29	31	29
7	28	25	30
8	19	24	26
9	25	23	27

Zinc (Zn)

Se tienen las concentraciones de zinc leídas con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 4. Concentraciones de zinc en análisis de blancos por fusión leídas con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.

<i>Límite detección 5 ppm Prueba</i>	<i>Zinc</i>		
	Crisoles pulidos		
	Concentración (ppm)		
1	1	0	2
2	1	1	1
3	0	0	2
4	0	0	1
5	0	1	0
6	1	1	1
7	1	1	0
8	0	0	1
9	2	1	0

Circonio (Zr)

Se tienen las concentraciones de circonio leídas con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 5. Concentraciones de circonio en análisis de blancos por fusión leídas con ICP—OES utilizando crisoles pulidos.

<i>Límite detección 10 ppm Prueba</i>	<i>Circonio</i>		
	Crisoles pulidos		
	Concentración (ppm)		
1	3	4	5
2	5	2	3
3	5	3	4
4	4	5	5
5	6	6	4
6	7	5	5
7	4	3	3
8	3	4	6
9	4	4	5

5.2.2. Limpieza química

Se le realizó un análisis de control de calidad a los crisoles de grafito tratados según la técnica de limpieza química implementada con ácido clorhídrico y ácido nítrico ambas al 20% v/v.

5.2.2.1. Análisis de blancos. Para el análisis de blancos con los crisoles tratados con la técnica de limpieza química se realizó un análisis por fusión donde los crisoles lavados se procesaron sin muestra; es decir; blancos que contenían únicamente fundente. Luego, un equipo de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) leyó los blancos para determinar el nivel de concentración de los elementos químicos de interés de la empresa encontrados en ellos (cobre, niobio, silicio, zinc y circonio). Una concentración mínima tolerable fijada por los límites del análisis involucraría una correcta limpieza del crisol de grafito, lográndose así evaluar la eficiencia de la técnica de limpieza utilizada. Se cuenta con el límite de detección de cada analito

permisible por la empresa, el cual es la concentración mínima a la cual el analito puede ser detectado de manera confiable por encima del ruido de fondo del método analítico utilizado.

Del análisis por fusión con metaborato de litio se tienen los siguientes resultados en una tabla con las concentraciones de los analitos expresadas en partes por millón para cada ácido utilizado en la técnica de limpieza.

Cobre (Cu)

Se tienen las concentraciones de cobre leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 6. Concentraciones de cobre en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.

<i>Límite detección 5 ppm Prueba</i>	<i>Cobre</i>					
	<i>Ácido nítrico</i>			<i>Ácido clorhídrico</i>		
	Concentración (ppm)			Concentración (ppm)		
1	4	5	5	3	4	4
2	4	5	5	2	2	4
3	5	3	4	3	3	2
4	4	3	4	3	3	2
5	3	4	4	3	3	4
6	5	4	3	4	4	3
7	5	4	4	5	4	3
8	3	3	4	3	4	4
9	5	5	4	5	5	4

Niobio (Nb)

Se tienen las concentraciones de niobio leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 7. Concentraciones de niobio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.

<i>Límite detección 10 ppm</i>	<i>Niobio</i>					
	Ácido nítrico			Ácido clorhídrico		
	Concentración (ppm)			Concentración (ppm)		
<i>Prueba</i>						
1	1	1	1	1	1	1
2	4	2	3	0	3	1
3	3	2	3	0	1	2
4	4	1	2	0	1	1
5	4	3	4	1	1	2
6	2	2	4	1	0	2
7	3	2	3	1	3	1
8	4	2	2	0	1	2
9	3	4	3	1	0	1

Silicio (Si)

Se tienen las concentraciones de silicio leídas con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 8. Concentraciones de silicio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.

<i>Límite detección 100 ppm</i>	<i>Silicio</i>					
	Ácido nítrico			Ácido clorhídrico		
	Concentración (ppm)			Concentración (ppm)		
<i>Prueba</i>						
1	33	28	25	26	24	25
2	40	36	37	19	22	20
3	28	22	28	20	23	21
4	18	20	23	24	28	26
5	27	38	34	18	22	17
6	29	28	32	19	17	20
7	38	41	35	21	20	21
8	36	37	36	19	17	19
9	37	36	42	16	20	18

Zinc (Zn)

Se tienen las concentraciones de zinc leídas con un espectrómetro de masas con

plasma acoplado inductivamente.

Tabla 9. Concentraciones de zinc en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.

<i>Límite detección 5 ppm Prueba</i>	<i>Zinc</i>					
	<i>Ácido nítrico</i>			<i>Ácido clorhídrico</i>		
	<i>Concentración (ppm)</i>			<i>Concentración (ppm)</i>		
1	2	6	3	1	1	2
2	2	5	1	0	0	0
3	1	3	4	0	1	1
4	3	4	3	1	2	1
5	5	2	3	1	2	1
6	4	3	4	0	0	1
7	4	2	2	0	2	0
8	5	4	2	0	1	1
9	4	5	3	1	0	1

Circonio (Zr)

Se tienen las concentraciones de circonio leídas con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 10. Concentraciones de circonio en análisis de blancos por fusión leídos con ICP—OES utilizando crisoles lavados con la técnica de limpieza química.

<i>Límite detección 10 ppm Prueba</i>	<i>Circonio</i>					
	<i>Ácido nítrico</i>			<i>Ácido clorhídrico</i>		
	<i>Concentración (ppm)</i>			<i>Concentración (ppm)</i>		
1	6	6	10	7	4	2
2	2	2	5	3	4	4
3	4	5	3	4	5	2
4	5	6	4	3	4	7
5	6	4	8	5	3	5
6	5	4	6	6	4	6
7	7	6	7	4	3	4
8	6	5	5	3	3	5
9	6	3	5	6	5	5

5.3. Análisis de costos

En el ámbito de la gestión de laboratorios químicos, cada procedimiento conlleva un costo asociado a los recursos necesarios para su ejecución. Estos recursos, según Torries (1988), se clasifican en cuatro categorías principales: Reactivos, Materiales, Equipos y Recursos Humanos. La determinación de estos costos se basa en el valor de adquisición y en criterios específicos para cada categoría, considerando su naturaleza como costos fijos o variables. Según Horngren et al. (2012) los costos fijos son aquellos que permanecen constantes independientemente del volumen de actividad del laboratorio, mientras que los costos variables fluctúan en proporción directa con el nivel de actividad o uso. Esta distinción permitió realizar el análisis de costos al año 2024 relacionados a la limpieza de los crisoles de grafito.

5.3.1. Limpieza Física

El costo de la operación de limpieza física fue la suma de los costos directos y los costos indirectos. Sin embargo; debido a que el objeto de calcular el costo de este proceso es compararlo con el costo total de limpieza química, no se consideraron los costos indirectos debido a que para ambas técnicas este valor es el mismo. Por lo que se calcularon los costos directos siendo estos sí exclusivos de la técnica de limpieza física.

A continuación, se resumen en una tabla los costos asociados a la limpieza física.

Tabla 11. Costos implicados en la limpieza física.

Limpieza física		(\$)
Costos fijos		
Equipos	0.16	
	Pulidor	0.111
	Soplete	0.045
Costos variables		
Material	0.002	
	Costo de accesorios pulidor	0.002
Energía	0.02	
	Pulidor	0.015
	Soplete	0.005
Humano	3.15	
	Acondicionamiento taladro/pulidor	0.004
	Analista limpieza de crisoles	3.150

A continuación, se detallan los costos asociados a la limpieza física. las categorías de costos, su clasificación y el cálculo del costo respectivo.

Equipos. Considerados costos fijos. Se consideraron los costos del pulidor y el soplete utilizado para eliminar el remanente de polvo ocasionado por el pulido de los crisoles de grafito.

Tabla 12. Costo de equipos en la limpieza física.

Equipos	(\$)
Pulidor	0.11
Soplete	0.05
Costo de equipos	0.16

Pulidor. Los costos del pulidor incluyeron equipos como el taladro y el porta crisol.

Tabla 13. Costo del pulidor de crisoles de grafito.

Pulidor	(\$)
Taladro	0.06
Porta crisol	0.05
Costo pulidor	0.11

Taladro. Se calculó sumando los costos de depreciación y de mantenimiento preventivo.

Tabla 14. Costo del taladro para implementar el pulidor de crisoles de grafito.

Taladro	(\$)
Depreciación	0.02
Mantenimiento	0.05
Costo del taladro	0.06

Depreciación del taladro. El costo de depreciación del taladro se calculó teniendo en cuenta el valor de rescate y la vida útil del equipo. Se tiene la depreciación del taladro a continuación.

Tabla 15. Costo de depreciación del taladro.

Depreciación taladro	(\$)
Valor de equipo	402.1
Valor de rescate	80.42
Vida útil	7
Costo anual	45.95
Costo de depreciación total	321.68
Costo depreciación proyecto	0.02

Mantenimiento del taladro. Se consideró un mantenimiento preventivo teniendo en cuenta los repuestos, recursos humanos, inactividad del equipo por parada de mantenimiento, y la frecuencia de mantenimiento. A continuación, se muestran los costos asociados.

Tabla 16. Costo mantenimiento preventivo del taladro.

Mantenimiento preventivo Taladro (\$)	
Repuestos	40.2
Humano	40.0
Inactividad	232.2
Frecuencia	3.0
Costo mantenimiento	312.4
Costo mantenimiento anual	937.2
Costo mantenimiento proyecto	0.05

La inactividad del taladro por parada de mantenimiento se calculó teniendo en cuenta la ganancia perdida que podría ser producida por el quipo operante, recursos humanos encargados de realizar el mantenimiento, y el tiempo de duración del mantenimiento.

La ganancia esperada se tomó teniendo en cuenta el costo de ahorro de limpiar la cantidad máxima de crisoles considerando que se demora 1 minuto y medio por crisol, y cada crisol costó \$8. Los cálculos se hicieron respecto a su valor por hora. Teniéndose los siguientes valores.

Tabla 17. Costo de inactividad por mantenimiento preventivo del taladro.

Inactividad del taladro (\$)	
Ganancia por hora	380
Humano	7
Tiempo de parada	0.6
Costo inactividad por hora	232.2

Porta crisol. El costo del porta crisol se determinó teniendo en cuenta el costo de depreciación y el costo de mantenimiento. A continuación, se muestra el costo total.

Tabla 18. Costo del porta crisol para pulir crisoles de grafito.

Porta crisol	(\$)
Depreciación	0.00
Mantenimiento	0.04
Costo del porta crisol	0.05

Depreciación del porta crisol. La depreciación del porta crisol se calculó en base a la siguiente tabla. Se debe mencionar que el costo de depreciación anual obtenido se multiplica por el factor de tiempo al proyecto según la ecuación 5.

Tabla 19. Costo de depreciación del porta crisol.

Depreciación porta crisol	(\$)
Valor de equipo	110
Valor de rescate	22
Vida útil	9
Costo anual	9.8
Costo de depreciación total	88.0
Costo depreciación proyecto	0.005

Mantenimiento preventivo del porta crisol. El mantenimiento preventivo del porta crisol se calculó considerando el costo de repuestos, el de recursos humanos, la inactividad por parada de mantenimiento y la frecuencia de mantenimiento anual. A continuación se tienen los costos asociados.

Tabla 20. Costo de mantenimiento preventivo del porta crisol.

Mantenimiento preventivo	(\$)
Repuestos	11.0
Humano	30.0
Inactividad	232.2
Frecuencia	3.0
Costo mantenimiento	273.2
Costo mantenimiento anual	819.6
Costo mantenimiento proyecto	0.04

Soplete. Los costos del soplete involucran la depreciación y el mantenimiento preventivo.

Tabla 21. Costo del soplete.

Soplete	(\$)
Depreciación	0.00
Mantenimiento	0.04
Costo del soplete	0.05

La depreciación del soplete se calculó usando la siguiente tabla.

Tabla 22. Costo de depreciación del soplete.

Depreciación soplete	(\$)
Valor de equipo	54.99
Valor de rescate	11.00
Vida útil	5.00
Costo anual	8.80
Costo de depreciación total	43.99
Costo depreciación proyecto	0.002

El mantenimiento preventivo del soplete se calculó en base a la siguiente tabla.

Tabla 23. Costo de mantenimiento preventivo del soplete.

Mantenimiento preventivo (\$)	
Repuestos	5.5
Humano	40.0
Inactividad	232.2
Frecuencia	3.0
Costo mantenimiento	277.7
Costo mantenimiento anual	833.1
Costo mantenimiento proyecto	0.04

La inactividad por parada de mantenimiento del soplete se determinó siguiendo la siguiente tabla.

Tabla 24. Costo de inactividad por mantenimiento del soplete.

Inactividad		\$
	Ganancia por hora	380
	Humano	7
	Tiempo de parada	0.6
Costo inactividad		232.2

Energía. Considerado costo variable. Se calculó sumando los costos de energía involucrados en los equipos del pulidor y el soplete. El costo de energía se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 25. Costo de energía en la limpieza física.

Energía		(\$)
	Pulidor	0.015
	Soplete	0.005
Costo de energía		0.02

Taladro. El costo de consumo de energía del pulidor se calculó en base a la siguiente tabla.

Tabla 26. Costo de energía del pulidor.

Pulidor		(\$)
Consumo del equipo	Kw/h	0.65
Horas de consumo	h	0.45
Costo electricidad	\$/kw	0.05
Costo energía taladro		0.01

Soplete. El costo de energía del soplete se calculó en base a la siguiente tabla.

Tabla 27. Costo de energía del soplete.

Soplete		(\$)
Consumo del equipo	Kw/h	0.2
Horas de consumo	h	0.45
Costo electricidad	\$/kw	0.05
Costo energía		0.005

Materiales. Los materiales se calcularon teniendo en cuenta el costo de los accesorios involucrados en la implementación de la punta del pulido. Se tienen los siguientes costos.

Tabla 28. Costo de materiales en la limpieza física.

Materiales		(\$)
	Pulidor	0.002
Costo materiales		0.002

El costo de los accesorios considerados en el cálculo de materiales para el pulidor fueron la broca para pulido y el disco para pulido. A continuación, el costo de materiales asociados.

Tabla 29. Costo de accesorios para el pulidor.

Pulidor		(\$)
Accesorios	Broca de pulido	0.0008
	Disco de pulido	0.0015
Costo de accesorios pulidor		0.0023

Humano. El costo humano se considera costo variable porque se está considerando al personal encargado de realizar el mantenimiento y al personal analista encargado de realizar la limpieza del crisol. Sujeto a la variación de la cantidad de crisoles que se deben pulir en este caso para 27 crisoles involucrándose 54 min para el proceso de pulido y sopleteo del crisol de grafito.

Tabla 30. Costo de recursos humanos para la limpieza física.

Humano		
	Acondicionamiento taladro/pulidor	0.0041
	Analista limpieza de crisoles	3.15
Costo humano		3.15

5.3.2. Limpieza Química

El costo de la operación de limpieza química fue la suma de los costos directos y los costos indirectos. Sin embargo, debido a que el objeto de calcular el costo de este proceso es compararlo con el costo total de limpieza física, no se consideraron los costos indirectos debido a que para ambas técnicas este valor es el mismo. Por lo que se calcularon los costos directos siendo estos sí exclusivos de la técnica de limpieza química.

A continuación, se resumen en una tabla los costos asociados a la limpieza química.

Tabla 31. Costos asociados a la limpieza química.

Limpieza química			(\$)
Costos fijos	Equipos	Dispensador ácido clorhídrico	0.03
		Dispensador ácido nítrico	0.03
		Dispensador agua ultrapura	0.03
	Humano	Analista de laboratorio	3.5
Costos variables	Reactivos	Agua ultrapura	2.16
		HCl	0.82
		HNO ₃	1.28
	Materiales		
		Envase teflón	0.01

Se detallan las categorías de costos, su clasificación y el cálculo de los costos respectivos a continuación.

Reactivos. Considerados como costos variables debido a que estos insumos están calculados en base a la dosificación de la concentración química requerida para cada procedimiento respecto al precio de compra. La concentración

química de las soluciones de ácido clorhídrico y ácido nítrico fue del 20% en agua ultrapura para 2 litros de solución por cada ácido.

- Agua ultrapura

Se utilizó agua ultrapura para enjuagar los crisoles de grafito usados previamente en procesos analíticos de minerales. Se utilizó 1 litro para el enjuague previo de los crisoles.

Luego, se utilizó agua ultrapura para preparar las soluciones de ácidos al 20% en 2 litros para ambos ácidos, usándose para la etapa de limpieza química 80% (2 litros) de agua ultrapura, resultando en 1.6 litros para la preparación de ácido clorhídrico y a su vez 1.6 litros para la solución de ácido nítrico. Sumando en total 3.2 litro de agua ultrapura para la etapa de limpieza química.

Después, se utilizó agua ultrapura para enjuagar los crisoles de grafito al terminar del proceso de limpieza química. Se utilizó 1 litro para el enjuague final de los crisoles.

Se obtuvo la siguiente tabla de costos asociados al reactivo de agua ultrapura considerando \$ 0.6 como el precio por litro brindado por el área de logística de la empresa.

Tabla 32. Costo de agua ultrapura para la limpieza química.

Agua ultrapura			
	Volumen (L)	Precio (\$/L)	Costo (\$)
Enjuague previo	1	0.6	0.6
Limpieza Química	1.6	0.6	0.96
Enjuague final	1	0.6	0.6
	Costo Agua ultrapura		2.16

- Ácido clorhídrico

Se utilizó ácido clorhídrico de calidad para análisis químicos para preparar una solución al 20% de concentración en 2 litros. Se utilizó entonces 0.4 litros de ácido clorhídrico.

Se obtuvo la siguiente tabla de costos asociados al reactivo de ácido clorhídrico considerando \$ 2.06 como el precio por litro brindado por el área de logística de la empresa.

Tabla 33. Costo de ácido clorhídrico para la limpieza química.

Ácido clorhídrico			
	Volumen (L)	Precio (\$/L)	Costo (\$)
Limpieza química	0.4	2.06	0.824

- Ácido nítrico

Se utilizó ácido nítrico de calidad para análisis químicos para preparar una solución al 20% de concentración en 2 litros. Se utilizó entonces 0.4 litros de ácido nítrico.

Se obtuvo la siguiente tabla de costos asociados al reactivo de ácido nítrico considerando \$ 3.2 como el precio por litro brindado por el área de logística de la empresa.

Tabla 34. Costo de ácido nítrico para la limpieza química.

Ácido nítrico			
	Volumen (L)	Precio (\$/L)	Costo (\$)
Limpieza química	0.4	3.2	1.28

Materiales. Considerados como costos variables. Se utilizaron 2 vasos teflón de una capacidad de 2 litros cada uno para cada reactivo. El costo asociado a los

materiales fue establecido tomando en cuenta su vida útil para calcular el costo por uso de materiales.

Se obtuvo la siguiente tabla de costos asociados a los materiales, considerando \$ 10 como el costo inicial; es decir, el costo de compra de cada envase teflón.

Tabla 35. Costo de envase de teflón.

Envase de teflón		
	Costo inicial (\$)	10
	Vida útil (usos)	1000
Costo por uso		0.01

Equipos. Considerados como costos fijos. Se utilizaron tres dispensadores, uno para dosificar agua ultrapura y dos para dosificar el volumen requerido de ácido clorhídrico y de ácido nítrico. El costo asociado a los equipos se realizó teniendo en cuenta la depreciación del equipo considerando el valor de rescate y la vida útil de los dispensadores. Se calculó el costo de depreciación por dispensador a partir de los datos de la siguiente tabla y teniendo en cuenta la ecuación (6).

Tabla 36. Costo de depreciación de dispensadores.

Dispensadores			
Costo total en la vida útil			
	Valor de equipo (\$)		274.14
	Valor de rescate (%)		54.83
	Vida útil (años)		5.00
	Costo anual		43.86
	Costo de depreciación total		219.31
Costo de depreciación proyecto			0.03

Recursos Humanos. Considerados como costos fijos. Se consideró al

profesional involucrado en el procedimiento de limpieza química de los crisoles. Para el costo de recursos humanos se consideró el salario del profesional, valor proporcionado por el área de RR. HH. de la empresa ascendiendo a \$ 7 por hora, y el tiempo involucrado en la limpieza de crisoles directamente, el cual correspondió a 0.5 horas. Obteniéndose un costo de recursos humanos igual a \$3.5

VI. RESULTADOS

6.1. Comparación entre técnicas

Se compararon las tres técnicas de limpieza realizadas en cuanto a efectividad y costo.

6.1.1. Gráficas de control de calidad por analito

6.1.1.1. Cobre

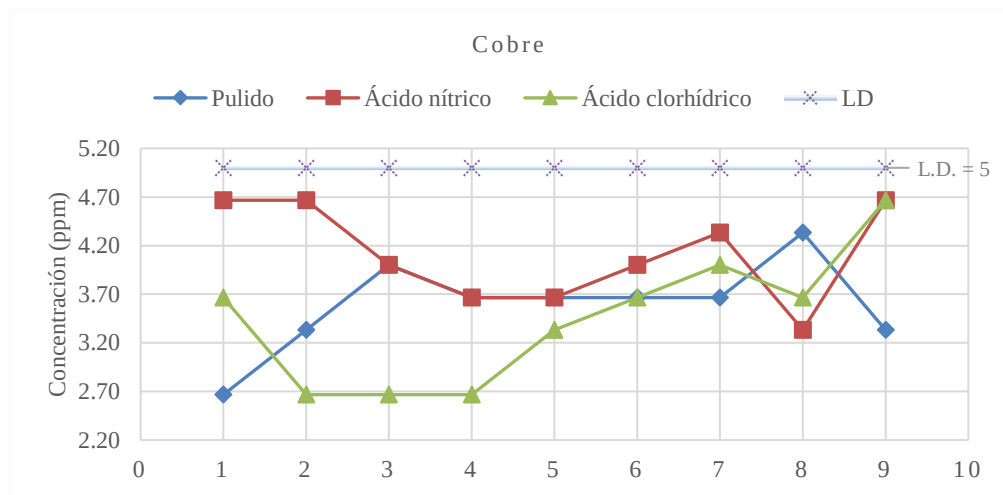


Gráfico 1. Gráfica de medias para el cobre con las tres técnicas de limpieza.

6.1.1.2. Niobio

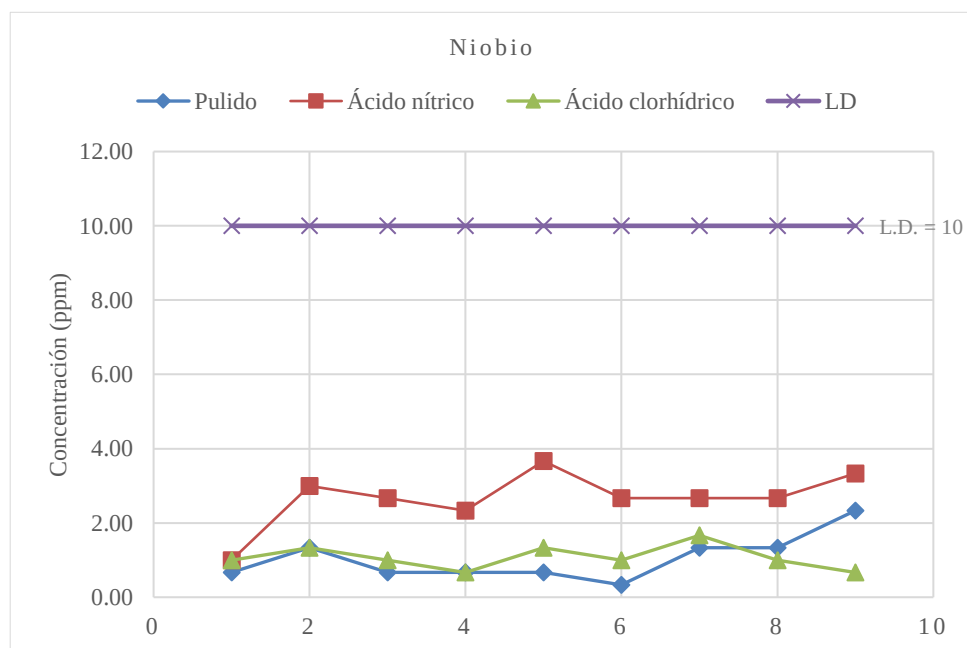


Gráfico 2. Gráfica de medias para el niobio con las tres técnicas de limpieza.

6.1.1.3. Silicio

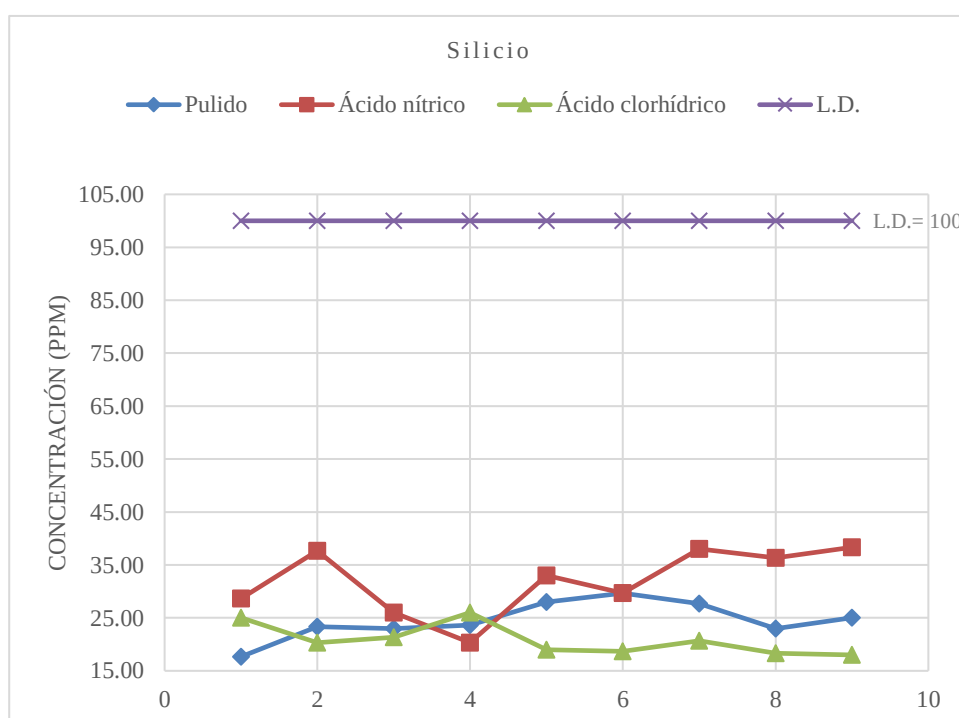


Gráfico 3. Gráfica de medias para el silicio con las tres técnicas de limpieza.

6.1.1.4. Zinc

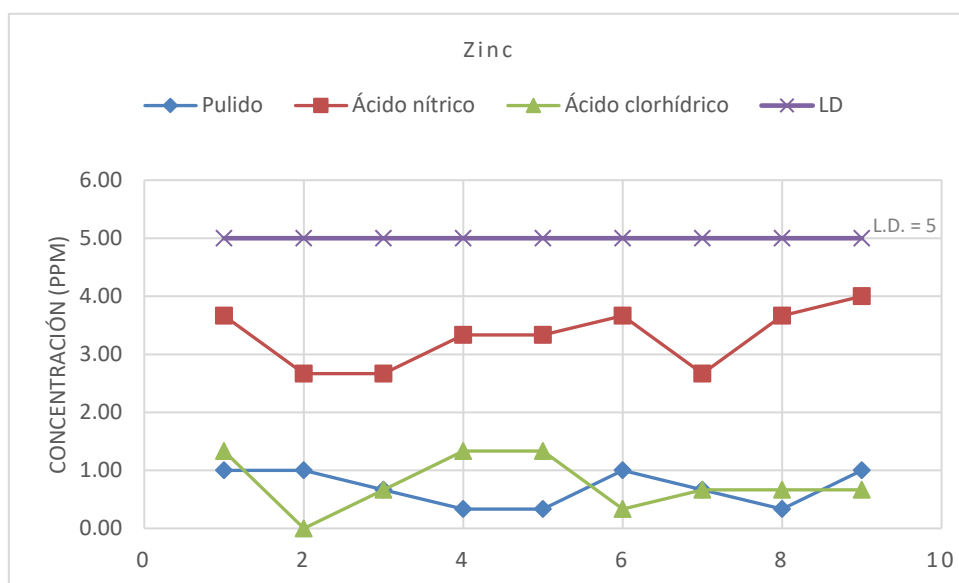


Gráfico 4. Gráfica de medias para el zinc con las tres técnicas de limpieza.

6.1.1.5. Circonio

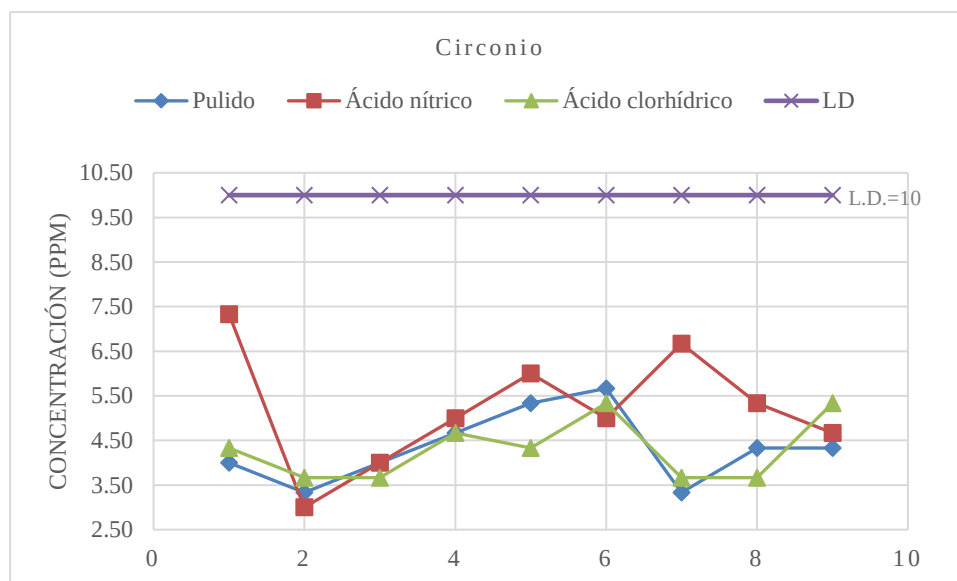


Gráfico 5. Gráfica de medias para el circonio con las tres técnicas de limpieza.

6.1.2. Efectividad de las técnicas de limpieza

Del análisis estadístico de control de calidad se obtuvieron los siguientes promedios de concentraciones de los analitos estudiados.

Tabla 37. Comparación del control de calidad entre la técnica física y la técnica química de limpieza.

		Promedios de concentraciones (ppm)				
		Cobre	Niobio	Silicio	Zinc	Circonio
Limpieza física		3.59	1.04	24.56	0.70	4.33
Limpieza química	Ácido clorhídrico	3.44	1.07	20.81	0.78	4.30
	Ácido Nítrico	4.11	2.67	32.00	3.30	5.22

De los promedios obtenidos se realiza una comparación por diferencial de porcentaje con valor absoluto entre las tres técnicas para identificar la diferencia entre ellas a nivel porcentual.

Tabla 38. Diferencia porcentual en el control de calidad entre la técnica física y la técnica

química de limpieza.

	Diferencia porcentual (%)				
	Cobre	Niobio	Silicio	Zinc	Circonio
Ácido clorhídrico / ácido nítrico	0.19	1.48	0.54	3.24	0.22
Ácido clorhídrico / pulido	0.04	0.04	0.15	0.11	0.01
Ácido nítrico/pulido	0.14	1.57	0.30	3.68	0.21

6.1.3. Costo de las técnicas de limpieza

Del análisis de costos por procesos se obtuvieron los siguientes resultados respecto a los costos de las tres técnicas de limpieza implementadas en el proyecto.

Tabla 39. Comparación entre los costos de las técnicas de limpieza.

Costo de la técnica de limpieza	\$
Pulido	3.34
Ácido clorhídrico	6.54
Ácido nítrico	7.00

6.1.4. Impacto económico de las técnicas de limpieza

Teniendo en cuenta que en la empresa se analizan aproximadamente 70 muestras de geoexploración de minerales por turno laboral y se cuentan con 3 turnos diarios, se realiza la estimación anual del impacto económico en la empresa la implementación de las técnicas de limpieza estudiadas. Se debe tener en cuenta que el costo de cada crisol de grafito nuevo es de \$8.00, el cual es el valor que se desea reducir al reutilizar una técnica de limpieza de crisoles.

Tabla 40. Impacto económico de las técnicas de limpieza de crisoles de grafito.

Técnica de limpieza	\$		%
	Costo por crisol	Costo anual	Porcentaje reducido
<i>Crisoles nuevos</i>	8	604800	
Ácido nítrico	7.00	529200	12.5
Ácido clorhídrico	6.54	494424	18.3
Pulido	3.34	252504	58.3

6.2. Limpieza física

6.2.1. Análisis estadístico de control de calidad

6.2.1.1. Análisis de blancos

Del análisis por fusión con los crisoles pulidos Sin muestra, es decir, blancos que contenían únicamente fundente se tienen los siguientes resultados en una tabla con los analitos expresados en partes por millón.

Se cuenta con el límite de detección de cada analito permisible por la empresa, el cual es la concentración mínima a la cual el analito puede ser detectado de manera confiable por encima del ruido de fondo del método analítico utilizado.

Cobre (Cu)

Utilizando la tabla 1 se realizó el cálculo de los promedios de las concentraciones leídas y el promedio del rango para cada prueba.

Tabla 41. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de cobre con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.

<i>Cobre</i> <i>Prueba</i>	<i>Crisoles pulidos</i>	
	Media (ppm)	Rango
1	2.67	1.00
2	3.33	2.00
3	4.00	2.00
4	3.67	3.00
5	3.67	3.00
6	3.67	1.00
7	3.67	3.00
8	4.33	2.00
9	3.33	1.00
<i>Media</i>	$\bar{X} = 3.59$	$\bar{R} = 2.00$

De la tabla 41 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias.

Siguiendo la fórmula para obtener los límites de control

$$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (12)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (13)$$

$$LCI = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (14)$$

Donde $A_2 = 1.023$ es una constante tabulada y depende del tamaño de subgrupo (en este caso de tamaño de subgrupo igual a 3).

Se obtienen los siguientes valores:

$$LCS = 5.64$$

$$LC = 3.59$$

$$LCI = 1.55$$

Teniendo en cuenta los límites de control, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad del analito cobre.

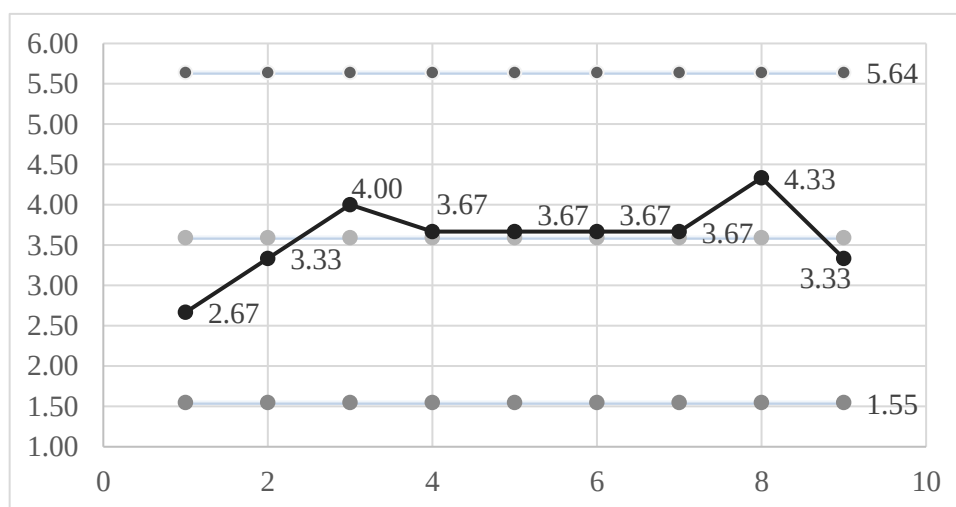


Gráfico 6. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito pulidos.

Niobio(Nb).

Utilizando la tabla 2 se realizó el cálculo de los promedios de las concentraciones leídas y el promedio del rango para cada prueba.

Tabla 42. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de niobio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos.

<i>Niobio</i>	<i>Crisoles pulidos</i>	
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango
1	0.67	1.00
2	1.33	1.00
3	0.67	1.00
4	0.67	2.00
5	0.67	1.00
6	0.33	1.00
7	1.33	1.00
8	1.33	2.00
9	2.33	1.00
<i>Media</i>	$\bar{\bar{X}} = 1.04$	$\bar{R} = 1.22$

De la tabla 42 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

Se obtienen los siguientes valores:

$$LCS = 2.29$$

$$LCS = 1.04$$

$$LCI = -0.21$$

Teniendo en cuenta los límites de control, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad del analito niobio.

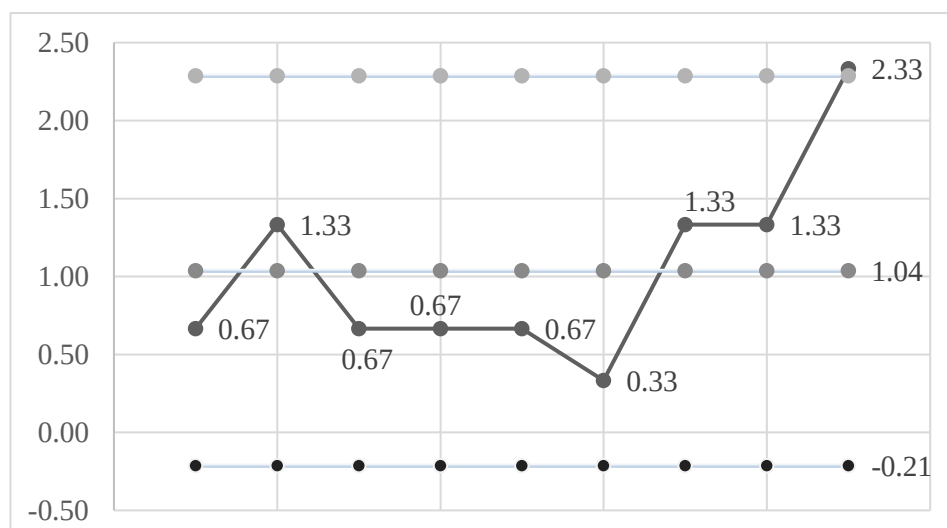


Gráfico 7. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito pulidos.

Silicio (Si)

Utilizando la tabla 3 se realizó el cálculo de los promedios de las concentraciones leídas y el promedio del rango para cada prueba.

Tabla 43. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de silicio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos

<i>Silicio</i> <i>Prueba</i>	<i>Crisoles pulidos</i>	
	Media (ppm)	Rango
1	17.67	5.00
2	23.33	3.00
3	23.00	4.00
4	23.67	3.00
5	28.00	9.00
6	29.67	3.00
7	27.67	5.00
8	23.00	7.00
9	25.00	4.00
<i>Media</i>	24.56	4.78

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad.

De la tabla 43 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media

de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

$$LCS = 29.44$$

$$LCS = 24.56$$

$$LCI = 19.67$$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control.

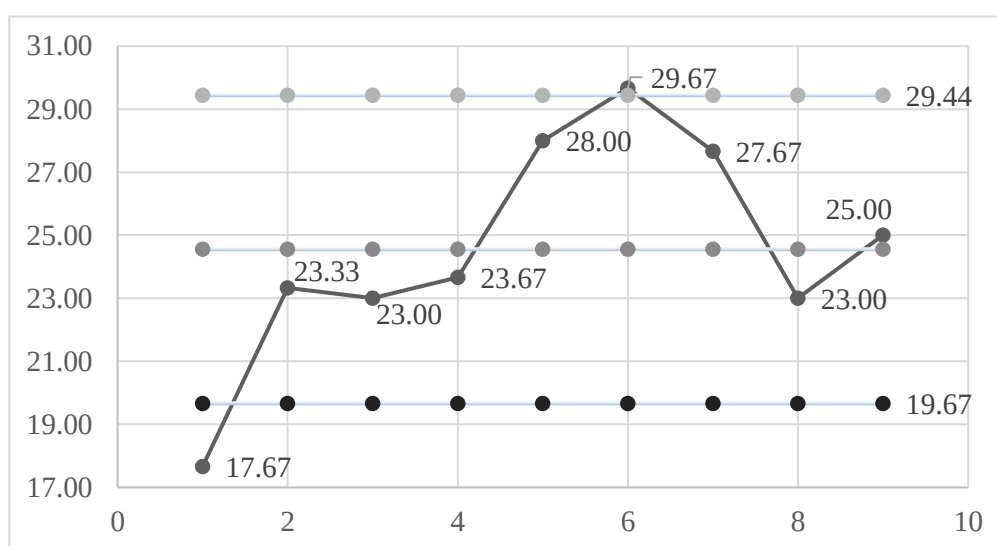


Gráfico 8. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito pulidos.

Zinc (Zn)

Utilizando la tabla 4 se realizó el cálculo de los promedios de las concentraciones leídas y el promedio del rango para cada prueba.

Tabla 44. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de zinc con la técnica de limpieza física en análisis de blancos

<i>Zinc</i>	<i>Crisoles pulidos</i>	
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango
1	1.00	2.00
2	1.00	0.00
3	0.67	2.00
4	0.33	1.00
5	0.33	1.00
6	1.00	0.00
7	0.67	1.00
8	0.33	1.00
9	1.00	2.00
<i>Media</i>	0.70	1.11

De la tabla 44 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

$$LCS = 1.84$$

$$LCS = 0.7$$

$$LCI = -0.43$$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control

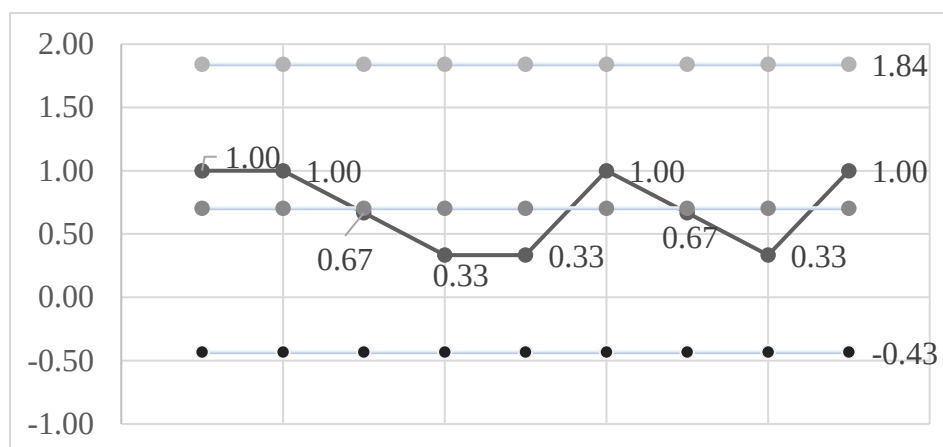


Gráfico 9. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito pulidos

6.2.1.2. Circonio (Zr)

Utilizando la tabla 5 se realizó el cálculo de los promedios de las concentraciones leídas y el promedio del rango para cada prueba.

Tabla 45. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de circonio con la técnica de limpieza física en análisis de blancos

<i>Circonio</i>		<i>Crisoles pulidos</i>	
<i>Prueba</i>		Media (ppm)	Rango
1		4.00	2.00
2		3.33	3.00
3		4.00	2.00
4		4.67	1.00
5		5.33	2.00
6		5.67	2.00
7		3.33	1.00
8		4.33	3.00
9		4.33	1.00
<i>Media</i>		4.33	2.00

De la tabla 45 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

$$LCS = 6.27$$

$$LCS = 4.33$$

$$LCI = 2.40$$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control.

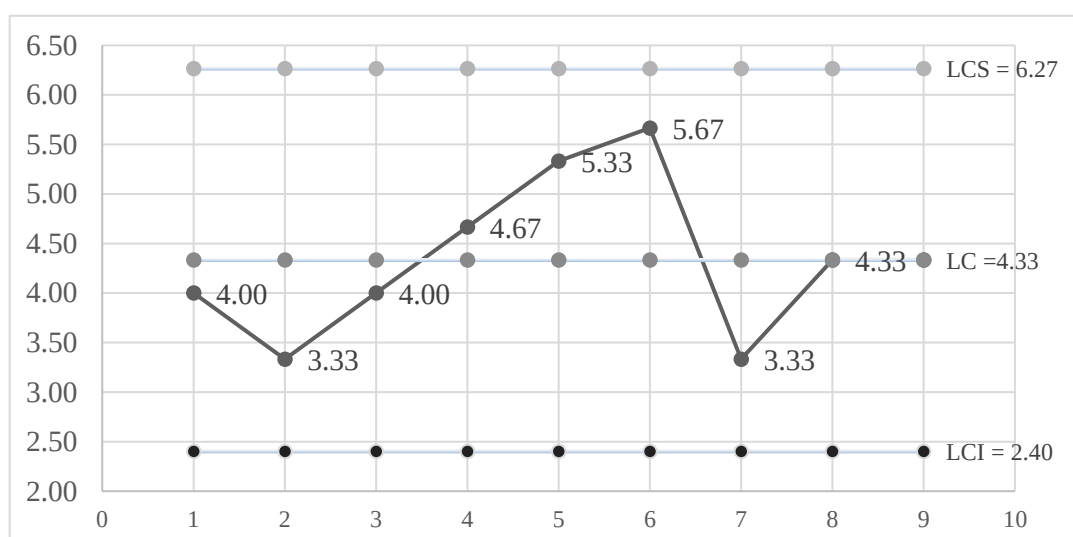


Gráfico 10. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito pulidos

6.2.2. Análisis de costos

El costo total de la implementación de una limpieza física se determinó de la suma de los costos fijos más los costos variables todos ellos calculados previamente en el capítulo de procedimiento obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 46. Costos asociados a la limpieza física.

Limpieza física		
Costos fijos		(\$)
Equipos		
	Pulidor	0.111
	Soplete	0.045
Costos variables		
Materiales		
	Costo de accesorios pulidor	0.002
Energía		
	Pulidor	0.015
	Soplete	0.005
Humano		
	Acondicionamiento taladro/pulidor	0.004
	Analista limpieza de crisoles	3.150
Costo limpieza física		3.34

6.3. Limpieza Química

Las lecturas de los elementos analizados en el método de ensayo por fusión con metaborato de litio se realizaron en un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los analitos estudiados fueron el cobre, niobio, silicio, zinc y circonio.

6.3.1. Análisis de control estadístico de calidad

6.3.1.1. Análisis de blancos

Del análisis por fusión con los crisoles sin muestra, es decir, blancos que contenían únicamente fundente se tienen los siguientes resultados en una tabla con los analitos expresados en partes por millón.

Se cuenta con el límite de detección de cada analito permisible por la empresa, el cual

es la concentración mínima a la cual el analito puede ser detectado de manera confiable por encima del ruido de fondo del método analítico utilizado.

Cobre (Cu)

Se tienen las medias de las concentraciones de cobre leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 47. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de cobre con la técnica de limpieza química.

<i>Cobre</i>	<i>Ácido nítrico</i>		<i>Ácido clorhídrico</i>	
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango	Media (ppm)	Rango
1	4.67	1.00	3.67	1.00
2	4.67	1.00	2.67	2.00
3	4.00	2.00	2.67	1.00
4	3.67	1.00	2.67	1.00
5	3.67	1.00	3.33	1.00
6	4.00	2.00	3.67	1.00
7	4.33	1.00	4.00	2.00
8	3.33	1.00	3.67	1.00
9	4.67	1.00	4.67	1.00
<i>Media</i>	$\bar{\bar{X}} = 4.11$	$\bar{R} = 1.22$	$\bar{\bar{X}} = 3.44$	$\bar{R} = 1.22$

De la tabla 47 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias.

Siguiendo las ecuaciones (12), (13) y (14) para obtener los límites de control donde $A_2 = 1.023$ es una constante tabulada y depende del tamaño de subgrupo (en este caso de tamaño de subgrupo igual a 3).

Se obtienen los siguientes valores:

Ácido Nítrico

$$LCS = 5.36$$

$$LCS = 4.11$$

$$LCI = 2.86$$

Ácido Clorhídrico

$$LCS = 4.69$$

$$LCS = 3.44$$

$$LCI = 2.19$$

Teniendo en cuenta los límites de control, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad del analito cobre.

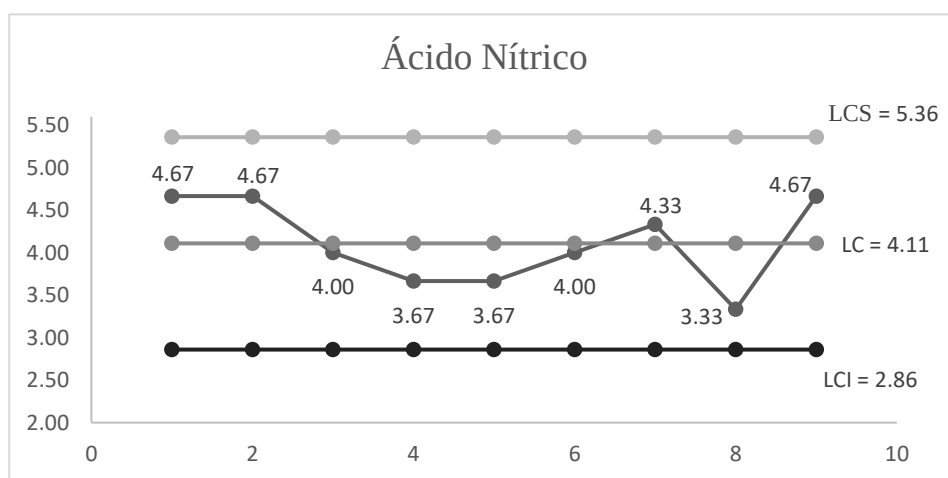


Gráfico 11. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico

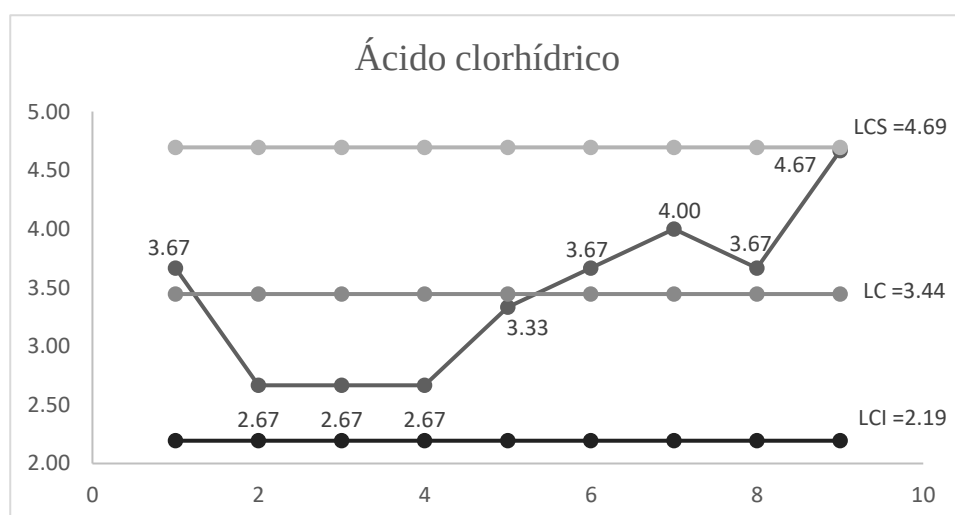


Gráfico 12. Gráfico de medias de cobre en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico

Niobio (Nb)

Se tienen las medias de las concentraciones de niobio leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 48. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de niobio con la técnica de limpieza química.

<i>Niobio</i>	<i>Ácido nítrico</i>	<i>Ácido clorhídrico</i>		
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango	Media (ppm)	Rango
1	1.00	0.00	1.00	0.00
2	3.00	2.00	1.33	2.00
3	2.67	1.00	1.00	1.00
4	2.33	3.00	0.67	1.00
5	3.67	1.00	1.33	1.00
6	2.67	2.00	1.00	1.00
7	2.67	1.00	1.67	2.00
8	2.67	2.00	1.00	1.00
9	3.33	1.00	0.67	1.00
<i>Media</i>	2.67	1.44	1.07	1.11

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad.

De la tabla 48 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

Se obtienen los siguientes valores:

Ácido Nítrico	Ácido Clorhídrico
$LCS = 4.14$	$LCS = 2.21$
$LCS = 2.67$	$LCS = 1.07$
$LCI = 1.19$	$LCI = -0.06$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control

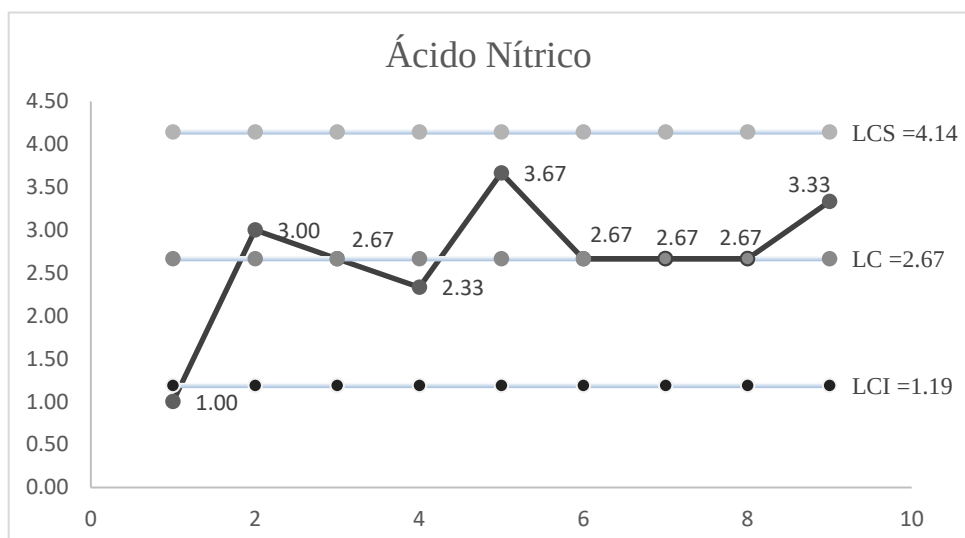


Gráfico 13. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.

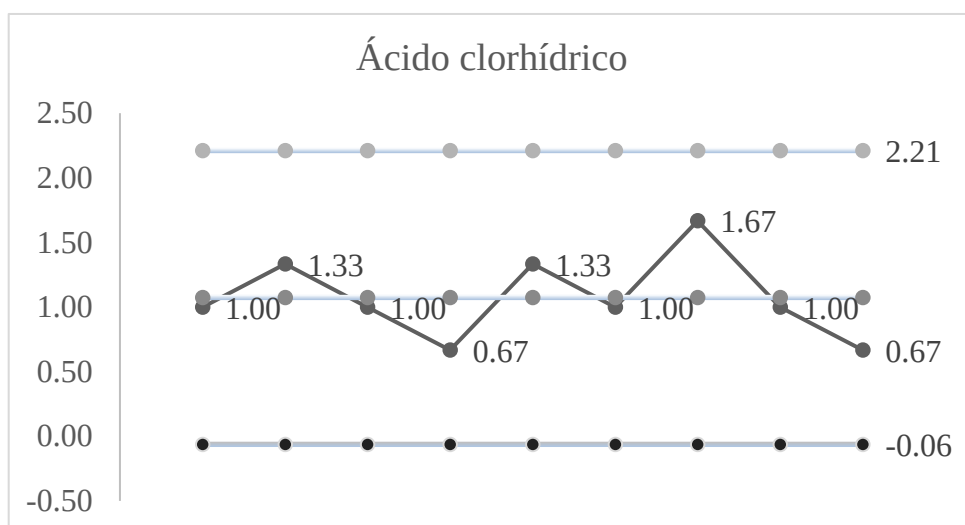


Gráfico 14. Gráfico de medias de niobio en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.

Silicio (Si)

Se tienen las concentraciones de silicio leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad.

Tabla 49. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de silicio.

<i>Silicio</i>	<i>Ácido nítrico</i>		<i>Ácido clorhídrico</i>	
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango	Media (ppm)	Rango
1	28.67	8.00	25.00	2.00
2	37.67	4.00	20.33	3.00
3	26.00	6.00	21.33	3.00
4	20.33	5.00	26.00	4.00
5	33.00	11.00	19.00	5.00
6	29.67	4.00	18.67	3.00
7	38.00	7.00	20.67	1.00
8	36.33	1.00	18.33	2.00
9	38.33	6.00	18.00	4.00
<i>Media</i>	32.00	5.78	20.81	3.00

De la tabla 49 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores.

<i>Ácido Nítrico</i>	<i>Ácido Clorhídrico</i>
$LCS = 37.91$	$LCS = 23.88$
$LCS = 32.00$	$LCS = 20.81$
$LCI = 26.09$	$LCI = 17.75$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control.

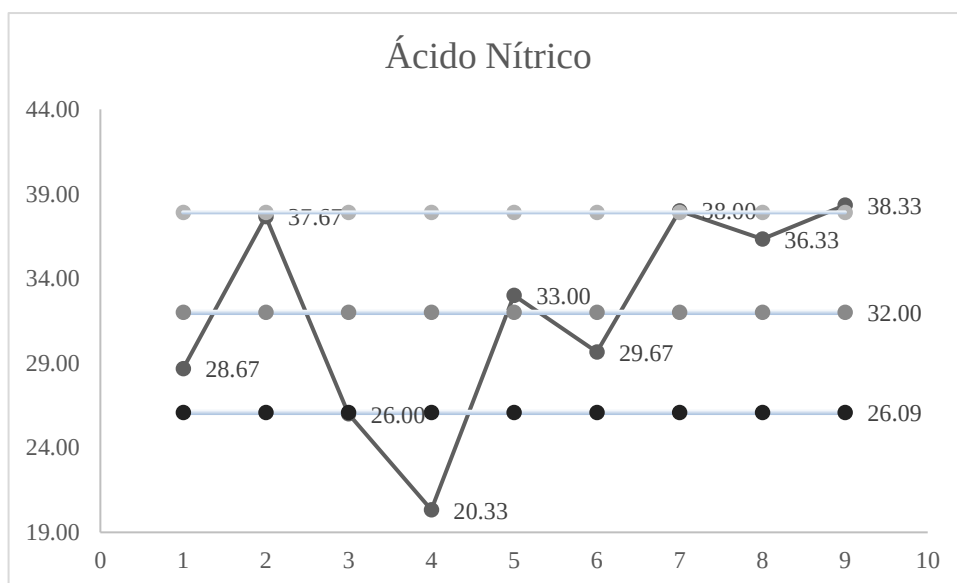


Gráfico 15. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico

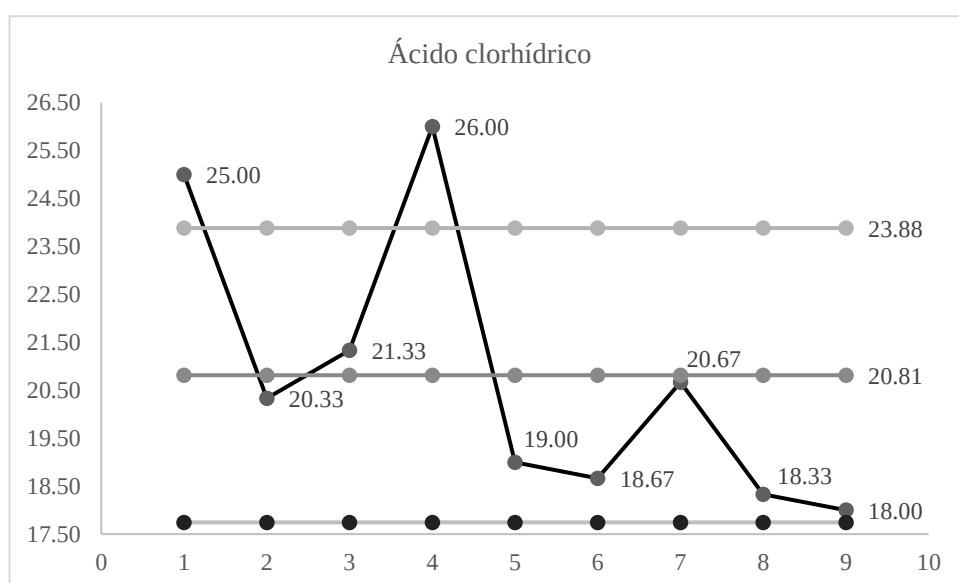


Gráfico 16. Gráfico de medias de silicio en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.

6.3.1.2. Zinc (Zn)

Se tienen las concentraciones de zinc leídos con un espectrómetro de masas con

plasma acoplado inductivamente

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad.

Tabla 50. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de zinc.

<i>Zinc</i>		<i>Ácido nítrico</i>		<i>Ácido clorhídrico</i>	
<i>Prueba</i>	Media (ppm)	Rango	Media (ppm)	Rango	
1	3.67	4.00	1.33	1.00	
2	2.67	4.00	0.00	0.00	
3	2.67	3.00	0.67	1.00	
4	3.33	1.00	1.33	1.00	
5	3.33	3.00	1.33	1.00	
6	3.67	1.00	0.33	1.00	
7	2.67	2.00	0.67	2.00	
8	3.67	3.00	0.67	1.00	
9	4.00	2.00	0.67	1.00	
<i>Media</i>	3.30	2.56	0.78	1.00	

De la tabla 50 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

Se obtienen los siguientes valores:

Ácido Nítrico	Ácido Clorhídrico
$LCS = 5.91$	$LCS = 1.80$
$LCS = 3.30$	$LCS = 0.78$
$LCI = 0.68$	$LCI = -0.25$

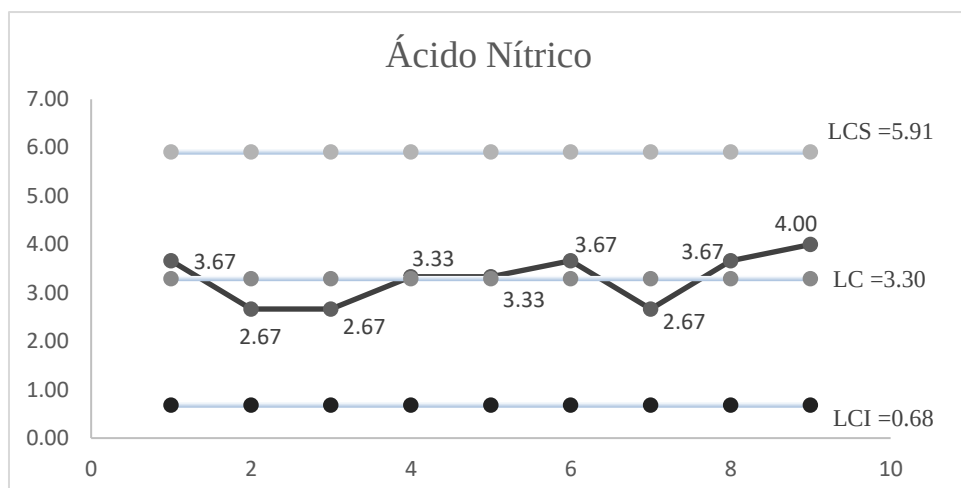


Gráfico 17. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito lavados con ácido nítrico.

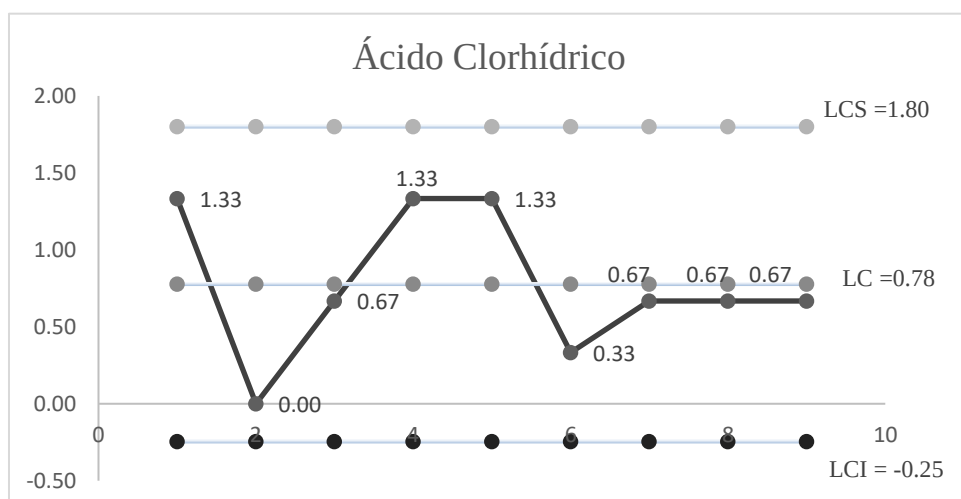


Gráfico 18. Gráfico de medias de zinc en crisoles de grafito lavados con ácido clorhídrico.

6.3.1.3. Circonio (Zr)

Se tienen las concentraciones de circonio leídos con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas, se obtuvieron las gráficas de control estadístico de calidad.

Tabla 51. Valores de las medias de las concentraciones y rangos de circonio.

<i>Circonio</i> <i>Prueba</i>	<i>Ácido nítrico</i>		<i>Ácido clorhídrico</i>	
	Media (ppm)	Rango	Media (ppm)	Rango
1	7.33	4.00	4.33	5.00
2	3.00	3.00	3.67	1.00
3	4.00	2.00	3.67	3.00
4	5.00	2.00	4.67	4.00
5	6.00	4.00	4.33	2.00
6	5.00	2.00	5.33	2.00
7	6.67	1.00	3.67	1.00
8	5.33	1.00	3.67	2.00
9	4.67	3.00	5.33	1.00
<i>Media</i>	$\bar{X} = 5.22$	$\bar{R} = 2.44$	$\bar{X} = 4.30$	$\bar{R} = 2.33$

De la tabla 51 se toman los valores de las medias de las concentraciones y la media de los rangos para determinar los límites para la gráfica de medias y de la misma forma que se calcularon los límites de control para el cobre, se tiene los siguientes valores:

Se obtienen los siguientes valores:

Ácido Nítrico	Ácido Clorhídrico
$LCS = 7.72$	$LCS = 6.68$
$LCS = 5.22$	$LCS = 4.30$
$LCI = 2.72$	$LCI = 1.91$

Finalmente se obtienen las gráficas de las medias de control.

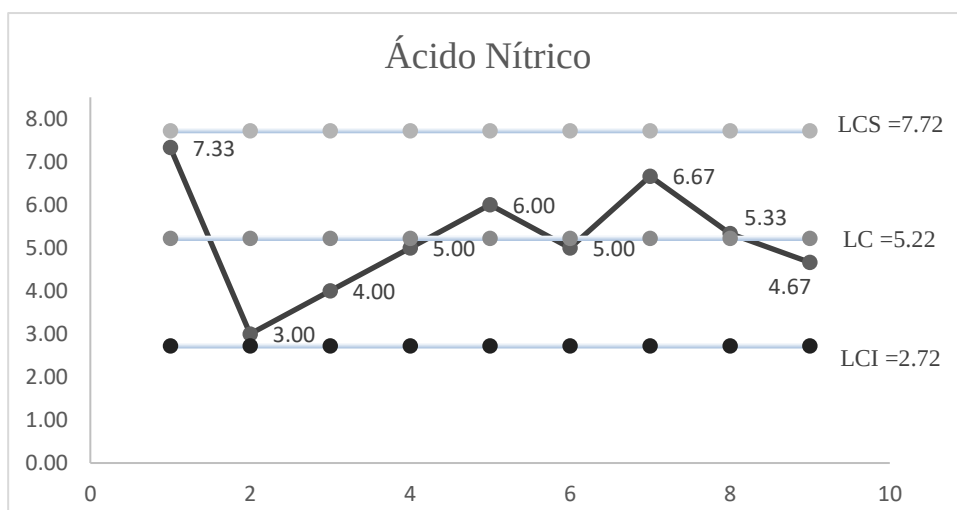


Gráfico 19. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito

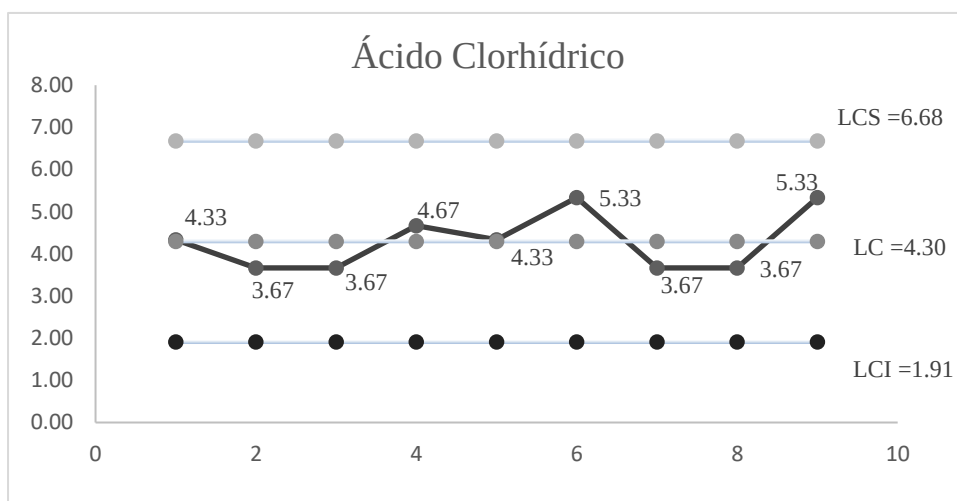


Gráfico 20. Gráfico de medias de circonio en crisoles de grafito

6.3.2. Análisis de costos

El costo total de la implementación de una limpieza química con ácido clorhídrico al 20% y con ácido nítrico al 20% se determinó de la suma de los costos fijos más los costos variables de cada técnica, obteniéndose los siguientes resultados.

6.3.2.1. **Ácido clorhídrico.** De la tabla 11 se tienen los costos asociados a la limpieza de crisoles de grafito con una solución al 20% de ácido clorhídrico. A

continuación, se muestra el costo de limpieza química con este reactivo.

Tabla 52. Costo limpieza ácido clorhídrico.

Ácido clorhídrico			(\$)
Costos fijos	Equipos	Dispensador ácido clorhídrico	0.03
		Dispensador agua ultrapura	0.03
	Humano	Analista de laboratorio	3.5
Costos variables	Reactivos	Agua ultrapura	2.16
		HCl	0.82
	Materiales	Envase teflón	0.01
Costo limpieza ácido clorhídrico			6.54

6.3.2.2. Ácido nítrico. De la tabla 11 se tienen los costos asociados a la limpieza de crisoles de grafito con una solución al 20% de ácido nítrico. A continuación, se muestra el costo de limpieza química con este reactivo.

Tabla 53. Costo limpieza ácido nítrico.

Ácido nítrico			(\$)
Costos fijos	Equipos	Dispensador ácido nítrico	0.03
		Dispensador agua ultrapura	0.03
	Humano	Analista de laboratorio	3.5
Costos variables	Reactivos	Agua ultrapura	2.16
		HNO ₃	1.28
	Materiales	Envase teflón	0.01
Costo limpieza ácido nítrico			7.00

VII. CONCLUSIONES

Del estudio de una técnica de limpieza química para reutilizar crisoles de grafito se puede concluir que es una técnica que retira del crisol casi por completo los remanentes de analitos estudiados, encontrándose concentraciones químicas menores a los límites de detección permisibles de la empresa.

De la técnica de limpieza química se concluye que el mejor reactivo para dicha técnica fue el ácido clorhídrico 20% v/v. El HCl en el análisis de control estadístico de calidad reflejó una concentración en ppm de analitos menor en comparación con los crisoles limpiados con ácido nítrico 20% v/v con una diferencia porcentual desde 0.19% hasta 3.24%.

De la comparación entre la limpieza química y limpieza física luego del análisis estadístico de control de calidad se concluye que la técnica de limpieza física presentó una menor y mínima diferencia en la concentración de analitos en los resultados con una diferencia porcentual desde 0.01% hasta 0.15% para el ácido clorhídrico y desde 0.21% hasta 3.68% para el ácido nítrico.

Del análisis de costos se determinó que la limpieza química con ácido clorhídrico fue de \$6.54, un costo menor respecto a la limpieza química con ácido nítrico cuyo costo fue de \$7.00.

Este proyecto fomentó una economía circular como modelo de proceso operativo en la empresa al reciclarse recursos que antes se desechaban. A su vez, impactó positivamente en la gestión de procesos de la empresa debido a la implementación de una técnica de limpieza para crisoles de grafito que garantizó la calidad de resultados y a su vez permitió reducir los costos de operación. Obteniéndose un costo de operación de \$7.00 con una limpieza química de ácido nítrico, \$6.54 con una limpieza química de ácido clorhídrico y de \$3.34 con una limpieza física mediante el pulido de los crisoles. Las tres técnicas representaron un costo menor respecto a

los \$8.00 antes considerados en la compra de cada crisol de grafito nuevo. La reutilización de crisoles de grafito impactó en gran medida en la rentabilidad de la empresa reduciendo los costos de operación hasta en un 58.3% con la implementación de una limpieza física, un 18.3% con una limpieza de crisoles de grafito con ácido clorhídrico y hasta un 12.5% con ácido nítrico.

VIII. REFERENCIAS

1. Barbisan, C. R. (Nov. 2022). *Definición de Punto de Fusión*. Significado.com. Desde <https://significado.com/punto-de-fusion/>
2. Barns, R. M. (2008). Importance of analytical method validation in chemical analysis. *Analytical Chemistry Review*, 36(4), 345-362. doi:10.1080/12345678.2008.98765432
3. Burns, T. G. (2002). Signal correction methods in chemical analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 45(6), 1123-1130. doi:10.1021/ac010890z
4. Cayulef Rojas, E. M. (2016). Determinación de costos para análisis de elementos de interés en muestras minerales (Trabajo de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Viña del Mar – José Miguel Carrera).
5. Di Maria, A., Merchán, M., Marchand, M., Eguizabal, D., García De Cortázar, M., & Van Acker, K. (2022). Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131790>.
6. García-Alonso, J. M., Fernández-Sánchez, M. L., & López-Sánchez, M. F. (2002). Determination of rare earth elements in geological materials by inductively coupled plasma mass spectrometry following lithium metaborate fusion. *Talanta*, 57(2)
7. Hendawi, R., Arnberg, L., & Di Sabatino, M. (2024). Crucibles and coatings for silicon melting and crystallization: An in-depth review of key considerations. *Progress in Materials Science*, 144, 101280. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101280>.
8. Houk, R. S., Fassel, V. A., Flesch, G. D., Svec, H. J., Gray, A. L., & Taylor, C. E. (1980). Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements. *Analytical Chemistry*, 52(14), 2283-2289.

<https://doi.org/10.1021/ac50064a012>

9. Horngren, C. T., Datar, S. M., & Rajan, M. V. (2012). Contabilidad de costos. Un enfoque gerencial (14a ed.). Pearson Educación.
10. Hunter, J. M., Morris, K. D., & Stirling, A. M. (1992). Cleaning procedures for trace element determinations in high purity graphite crucibles. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 7(1), 95-98.
11. Jennings, W. G. (1998). Background estimation in chemical analysis: Methods and applications. *Analytical Chemistry*, 70(8), 1712-1718. doi:10.1021/ac970732s
12. Sadlapurkar, A. V., Barache, U. B., Shaikh, A. B., Lawand, A. S., Gaikwad, S. H., & Lokhande, T. N. (2022). Development of new efficient and cost effective liquid-liquid extractive determination method for cobalt(II): Analysis of water, alloys and nano powder. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100026>
13. Schäfer, H., & Wöhrmann, C. (2009). Evaluation of Crucible Abrasion Tests for the Characterization of Mould Materials in High-Pressure Die Casting.
14. Suslick, K. S. (1991). Preparation and cleaning of graphite crucibles for trace analysis. *Analytical Chemistry*, 63(22), 2575-2579.
15. Torries, T. F. (1988). Competitive cost analysis in the mineral industries. *Resources Policy*, 14(3), 193-204. doi:10.1016/0301-4207(88)90005-0
16. Pierdant Rodríguez, A. I., & Rodríguez Franco, J. (2009). Control estadístico de la calidad de un servicio mediante Gráficas X y R. *Política y Cultura*, (32), 151-169.
17. Punto de fusión del grafito. Sitio web. Revisado 2024. <http://fundacionquimica.org/popelemento.php?simbolo=c#:~:text=El%20punto%20de%20fusi%C3%B3n%20del,%2C51%20kg%2Fm%C2%B3%20respectivamente>.

18. Rojas Villacís, Cynthia, & Zúñiga Arrobo, Cristian. (2020). Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Nambija. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 10(2), 50-60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.2568>
19. Rubinson, K. A. (2005). Quality control in chemical analysis: Detection and elimination of contamination. Analytical Chemistry, 77(12), 3759-3765. doi:10.1021/ac0513415
20. Yu, F., Feng, W., Luo, M., You, K., Ma, M., Jiang, R., Leng, J., & Sun, L. (2023). Techno-economic analysis of residential building heating strategies for cost-effective upgrades in European cities. iScience, 26(9), 107541. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107541>

IX. ANEXOS

Tabla 54. Tabla de constantes de control de calidad para las gráficas de medias.

Constantes para Gráficos de Control																
n	A	A2	A3	c4	1/c4	B3	B4	B5	B6	d2	d3	1/d2	D1	D2	D3	D4
2	2.121	1.880	2.659	0.798	1.253	0.000	3.267	0.000	2.606	1.128	0.853	0.886	0.000	3.686	0.000	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.886	1.128	0.000	2.568	0.000	2.276	1.693	0.888	0.591	0.000	4.358	0.000	2.575
4	1.500	0.729	1.628	0.921	1.085	0.000	2.266	0.000	2.088	2.059	0.880	0.486	0.000	4.698	0.000	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.940	1.064	0.000	2.089	0.000	1.964	2.326	0.864	0.430	0.000	4.918	0.000	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.952	1.051	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0.395	0.000	5.079	0.000	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.959	1.042	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.370	0.205	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.965	1.036	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.351	0.388	5.307	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.969	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.337	0.547	5.394	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.973	1.028	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.325	0.686	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.975	1.025	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.315	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.978	1.023	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.307	0.923	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.979	1.021	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	0.300	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.981	1.019	0.406	1.594	0.398	1.563	3.407	0.763	0.294	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.982	1.018	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	0.288	1.203	5.740	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.983	1.017	0.448	1.552	0.440	1.527	3.532	0.750	0.283	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.985	1.016	0.466	1.534	0.459	1.510	3.588	0.744	0.279	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.985	1.015	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	0.275	1.424	5.856	0.391	1.609
19	0.688	0.187	0.698	0.986	1.014	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	0.271	1.489	5.889	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.987	1.013	0.510	1.490	0.503	1.470	3.735	0.729	0.268	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.988	1.013	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	0.265	1.606	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.988	1.012	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	0.262	1.660	5.979	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.989	1.011	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	0.259	1.711	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.989	1.011	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	0.257	1.759	6.032	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.990	1.010	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.708	0.254	1.805	6.056	0.459	1.541