

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS:

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)

Para optar el título profesional de:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

**Bach. Josue Leonardo PEREZ MANCILLA
Bach. Lheonel CONDE VERA**

ASESOR:

Dr. León Fernando PÉREZ CHAUCA

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria:

A Dios, por ser mi fortaleza y guía durante este recorrido, permitiéndome culminar este logro académico con perseverancia y fe, a mis padres Nilo Conde Huamani y Inés Vera Noa, por ser mi fortaleza y ejemplo de perseverancia. Esta tesis es suya, porque sin su orientación, valores y apoyo incondicional, no habría alcanzado esta meta.

A mi hijo Ghael Mateo, porque en cada página de esta tesis hay un pedazo de mi esfuerzo, y en cada noche de desvelo estuvo presente tu sonrisa como luz de esperanza. Te dedico este logro no solo como un testimonio de lo que se puede alcanzar con esfuerzo, sino como una promesa silenciosa: que siempre lucharé para dejarte un camino más firme, más digno, y lleno de valores que trasciendan el tiempo.

A mi abuelo Aurelio Vera Lozano, que en paz descansa, mi más sincero agradecimiento por ser un faro de sabiduría y fortaleza en los momentos más desafiantes.

Lheonel

DEDICATORIA:

A Dios, por ser mi guía, protección, fortaleza, la luz que ilumina cada paso de mi camino y por permitirte alcanzar esta meta académica.

A mi papá Fernando, esta tesis te la dedico con todo el corazón, porque fuiste mi guía constante, mi fuerza en los momentos difíciles y un ejemplo que siempre seguiré; y a mi mamá Mary por su apoyo incondicional para lograr mi objetivo de vida.

A mi compañera Astry, por su paciencia y apoyo incondicional para el presente logro, mis hijas por ser mi inspiración constante, mi fuerza en los días difíciles y la razón más hermosa para seguir adelante. Todo lo que hago, lo hago con amor, pensando en el futuro que deseo construir para ustedes.

A mamá Santona y papá Feliciano, sé que estarán muy felices por este logro, abrazos hasta el cielo.

Josué

Agradecimiento

Nuestra gratitud y agradecimiento a nuestra Alma Mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por recibirnos en sus aulas y ser el ente de nuestra formación profesional.

A nuestra querida Escuela Profesional de Ingeniería Química y a los docentes por su apoyo incondicional, por sus valiosas enseñanzas y orientaciones en nuestra formación personal y académica.

Nuestro profundo reconocimiento al Dr. Ing. León Fernando Pérez Chauca asesor de la tesis, por las lecciones que trascendieron las paredes del aula, por dedicar horas de paciencia a corregir nuestros errores, y por inspirarnos a perseguir el rigor académico. Esta tesis es, en gran medida, fruto de su incansable apoyo.

Finalmente, nuestro agradecimiento al INGEMMET a través del convenio marco con la UNSCH por los resultados de loa análisis de DRX, al Dr. Gino PICASSO responsable del Laboratorio de catálisis de la Universidad Nacional de Ingeniería por los ensayos BET, a la Ing. Katia Mendoza Davalos responsable del laboratorio de suelos, aguas y foliares (LABSAF) (INIA-Ayacucho), nuestro agradecimiento muy especial al Ing. Melvin Rodríguez Vílchez, por su orientación, tiempo y disposición permanente de reactivos, materiales y equipos en el desarrollo de la investigación.

Resumen

El principal objetivo del estudio fue determinar las condiciones adecuadas para la alteración química de las cenizas volantes (CV), en base al incremento de su área superficial y utilización en la retención de iones Ni (II) y Pb (II). El estudio se distinguió por ser de naturaleza experimental, con una orientación cuantitativa y de nivel aplicativo. Durante la fase de la alteración química, se empleó el diseño factorial del tipo 2², siendo los factores la concentración de la solución de NaOH y masa de óxido de silicio. Se verificó la modificación por DRX por medio su composición de minerales. A través de la técnica BET (Brunauer, Emmett y Teller) se alcanzó 11,41 m²/g de área superficial para la CV inicial y de 17,60 m²/g como valor más elevado para la modificada; la técnica de modificación sugerido posibilitó el desarrollo del área superficial en 35,2 %, con condiciones adecuadas de NaOH 2,0 M y 1,0 g de óxido de silicio. Con ayuda del diseño factorial del tipo 3² se logró evaluar la magnitud de retención con soluciones aproximadas de 100 ppm de iones níquel (II) y plomo (II) de concentración inicial; consiguiéndose una retención de 16,50 % de iones níquel (II) y de 99,86 % para los iones plomo (II). Por tanto, se deduce que la investigación posibilitó la modificación química de las cenizas volantes. Las cenizas modificadas demostraron una capacidad moderada para retener iones níquel (II) y una eficiencia elevada en la retención de iones plomo (II), lo que podría ser empleado en la retención de otros metales pesados.

Palabras claves: área superficial, retención, ceniza volante, Níquel (II), Plomo (II)

Summary

The main objective of the study was to determine the appropriate conditions for the chemical alteration of fly ash (CV), based on the increase of its surface area and utilization in the retention of Ni (II) and Pb (II) ions. The study was distinguished for being experimental in nature, with a quantitative orientation and at an applicative level. During the chemical alteration phase, a factorial design of type 2^2 was used, the factors being the concentration of the NaOH solution and the mass of silicon oxide. The modification was verified by XRD by means of its mineral composition. Through the BET (Brunauer, Emmett and Teller) technique, $11,41 \text{ m}^2/\text{g}$ of surface area was reached for the initial CV and $17,60 \text{ m}^2/\text{g}$ as the highest value for the modified one; the suggested modification technique made possible the development of the surface area in 35,2 %, with suitable conditions of NaOH 2,0 M and 1,0 g of silicon oxide. With the help of the factorial design of type 3^2 , it was possible to evaluate the retention magnitude with solutions of approximately 100 ppm of nickel (II) and lead (II) ions of initial concentration; achieving a retention of 16,50 % of nickel (II) ions and 99,86 % for lead (II) ions. Therefore, it is deduced that the investigation made possible the chemical modification of the fly ashes. The modified ashes showed a moderate capacity to retain nickel (II) ions and a high efficiency in the retention of lead (II) ions, which could be used in the retention of lead (II) ions.

Keywords: surface area, retention, fly ash, Nickel (II), Lead (II)

Índice

Página

Dedicatoria:	i
Agradecimiento	iii
Resumen	iv
Summary	v
Índice.....	vi
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xii
I. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Formulación del Problema	3
1.2.1. Problema General	4
1.2.2. Problemas Específicos.....	4
1.3. Justificación de la Investigación	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Hipótesis	6
1.5.1 Hipótesis general	6
1.5.2. Hipótesis específica	6
II. Marco Teórico	7
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	7
2.2. Bases Teóricas	16
2.2.1. Ceniza Volantes	16

2.2.2. Adsorción.....	19
2.2.3. Contaminación con Metales Pesados.....	23
2.3.4. Difracción de Rayos X	25
2.2.5. Diseños Experimentales	27
2.2.6. Diseños Factoriales	29
2.2.7. Metodología de Superficie Respuesta (MSR).....	30
III. Materiales y Métodos	32
3.1. Tipo de Investigación	32
3.2. Diseño de la Investigación	32
3.3. Población y Muestra.....	32
3.4. Materiales y Reactivos	33
3.4.1. Materiales	33
3.4.2. Reactivos	33
3.5. Equipos	34
3.6. Operacionalización de Variables	34
3.7. Procedimientos	37
3.7.1. Tratamiento de las Cenizas.....	37
3.7.2. Modificación del Área Superficial de las Cenizas Volantes	39
3.7.3. Retención de iones Níquel (II) y Plomo (II) con Cenizas Volantes Modificadas	42
3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	45
3.9. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	45
IV. Resultados	47
4.1. Caracterización Inicial de la Ceniza Volantes	47
4.2. Modificación de las Cenizas Volantes.....	49
4.2.1. Composición Mineralógica	49
4.2.2. Área Superficial de las Cenizas Modificadas.....	53

4.3. Influencia de la Masa de Óxido de Silicio y Concentración de NaOH	56
4.3.1. Análisis de Varianza en el Aumento del Área Superficial.....	56
4.3.2. Coeficientes de Regresión para el Aumento del Área Superficial	58
4.3.3. Superficie Respuesta para el Aumento del Área Superficial.....	59
4.3.4. Gráfica de Contornos para el Incremento del Área Superficial.....	59
4.3.5. Influencia de la Masa de Óxido de Silicio y Concentración de NaOH ...	61
4.4. Retención de Iones Níquel (II)	62
4.4.1. Influencia de Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones Níquel (II).....	63
4.4.1.1. Análisis de Varianza para el Porcentaje de Retención.....	63
4.4.1.2. Coeficientes de Regresión para el Porcentaje de Retención de Iones Níquel (II).	66
4.4.1.3. Superficie de Respuesta para el Porcentaje de Retención de iones Níquel (II).....	67
4.4.1.4. Gráfica de Contornos para el Porcentaje de Retención de Iones Níquel (II).....	68
4.4.1.5. Influencia del Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones Níquel (II)	69
4.5. Retención de Iones Plomo (II)	70
4.5.1. Influencia de Tiempo y Velocidad en la Retención de Iones Plomo (II)	71
4.5.1.1. Análisis de Varianza para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).....	71
4.5.1.2. Coeficientes de Regresión para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II)	74
4.5.1.3. Superficie de Respuesta para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).....	75
4.5.1.4. Gráfica de Contornos para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).....	76
4.5.1.5. Influencia del Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).	77
V. Discusión de Resultados.....	78

VI. Conclusiones	84
VII. Recomendaciones	86
VIII. Referencias Bibliográficas.....	87
IX. Glosario.....	92
X. Anexos.....	93
10.1. Resultados de los Análisis por Difracción de Rayos X	93
10.2. Difractogramas independientes	100
10.3. Resultados de Área Superficial por el Método BET (UNI-Lima).....	105
10.4. Resultados de la concentración inicial y final de iones Ni (II) y Pb (II)	110
10.5. Resultados del porcentaje de retención de iones Ni (II) y Pb (II)	112
10.6. Resultados de pH en el proceso de retención de iones Ni (II) y Pb (II) ...	113
10.7. Galería de fotos	114

Lista de tablas

	Página
Tabla 1 Composición química de las cenizas volantes en bruto.....	19
Tabla 2 Tratamientos del diseño 2^2	30
Tabla 3 Tratamientos del diseño 3^2	31
Tabla 4 Operacionalización de variables	35
Tabla 5 Ensayos propuestos para la retención de níquel (II) con ceniza volante inicial....	39
Tabla 6 Ensayos propuesto para la retención de plomo (II) con ceniza volante inicial	39
Tabla 7 Niveles experimentales en la modificación de las cenizas volantes.....	40
Tabla 8 Niveles experimentales de combinación en la modificación de las cenizas volantes	42
Tabla 9 Niveles experimentales para la retención de iones níquel (II) y plomo (II)	44
Tabla 10 Niveles de combinación experimental para la retención de iones níquel (II).....	44
Tabla 11 Niveles de combinación experimental para la retención de iones plomo (II).....	45
Tabla 12 Resultados de la retención de iones níquel (II) usando ceniza volante inicial....	49
Tabla 13 Resultados de la retención de iones plomo (II) usando ceniza volante inicial....	49
Tabla 14 Composición mineralógica de la ceniza volante inicial y modificadas.....	50
Tabla 15 Resultados del área superficial de las cenizas volantes modificadas	53
Tabla 16 Análisis de variabilidad para el aumento del área superficial.....	56
Tabla 17 Efectos aproximados para el aumento del área superficial.....	58
Tabla 18 Coeficientes de regresión para el aumento del área superficial.....	58
Tabla 19 Respuesta optimizada para el aumento del área superficial.....	60
Tabla 20 Resultados de la retención de iones níquel (II) según el diseño factorial 3^2	62
Tabla 21 Análisis de variabilidad para el porcentaje de retención de iones níquel (II)	64
Tabla 22 Efectos aproximados para el porcentaje de retención de iones níquel (II).....	66

Tabla 23 Coeficientes de regresión para el nivel de retención de iones níquel (II)	66
Tabla 24 Resultado óptimo para el porcentaje de retención de iones níquel (II)	68
Tabla 25 Resultados de la retención de iones plomo (II) según el diseño factorial 3^2	70
Tabla 26 Análisis de la variabilidad para el porcentaje de retención de iones plomo (II) ..	72
Tabla 27 Efectos aproximados para el porcentaje de retención de iones plomo (II)	73
Tabla 28 Coeficientes de regresión para el nivel de retención de iones plomo (II)	74
Tabla 29 Resultado optimizado para el porcentaje de retención de iones plomo (II)	76

Lista de figuras

	Página
Figura 1 Microscopia electrónica de las cenizas volantes	17
Figura 2 Isotermas de adsorción según clasificación del IUPAC	21
Figura 3 Diagrama de bloques para la obtención de cenizas volantes.....	38
Figura 4 Diagrama de bloques de la modificación química de la ceniza volante	41
Figura 5 Difractograma de la ceniza volante inicial (DRX-i)	47
Figura 6 Isotherma de adsorción y desorción de la ceniza volante inicial	48
Figura 7 Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-A.....	51
Figura 8 Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-B.....	51
Figura 9 Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-C.....	52
Figura 10 Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-D.....	52
Figura 11 Isotherma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-A	54
Figura 12 Isotherma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-B	54
Figura 13 Isotherma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-C	55
Figura 14 Isotherma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCMV-D	55
Figura 15 Diagrama de Pareto estándar para el aumento del área superficial.....	57
Figura 16 Diagrama de superficie de respuesta para el aumento del área superficial	59
Figura 17 Gráfica de contornos proyectada para el aumento del área superficial.....	60
Figura 18 Influencia de la masa de óxido de silicio y concentración de NaOH para el aumento del área superficial	61

Figura 19 Carta estándar de Pareto para el porcentaje de retención de iones níquel (II).	65
Figura 20 Diagrama de superficie de respuesta para el porcentaje de retención de iones níquel (II)	67
Figura 21 Gráfica de contornos aproximado para el porcentaje de retención de iones níquel (II)	68
Figura 22 Influencia de tiempo y velocidad en el porcentaje de retención de iones níquel (II)	69
Figura 23 Carta estándar de Pareto para el porcentaje de retención de iones plomo (II).	73
Figura 24 Diagrama de superficie de respuesta para el porcentaje de retención de iones plomo (II)	75
Figura 25 Gráfica de contornos aproximado para el porcentaje de retención de iones plomo (II)	76
Figura 26 Influencia de tiempo y velocidad en el porcentaje de retención de iones plomo (II)	77

I. Introducción

Respecto al carbón Boycheva y otros (2020), indican que sigue siendo la principal fuente de energía a nivel mundial. La quema de carbón en plantas de energía produce varios contaminantes en el aire, incluyendo partículas finas. La emisión de partículas de ceniza, conocidas como ceniza volante, se controla mediante su captura de los gases de cenizas volantes en sistemas de recolección de polvo. Sin embargo, el posterior manejo de estas cenizas puede representar una amenaza para el entorno, ya que afecta la composición química de las aguas subterráneas, provoca la acidificación del suelo y permite la acumulación de partículas que podrían ser tóxicas.

Por otro lado, Gjyli et al. (2021) señala que, en los últimos años los problemas a los que se enfrenta el medio acuático, como el despilfarro de agua (Objetivo 6-Desarrollo Sostenible) y la presencia de bolsas de plástico en el océano (Objetivo 14-Desarrollo Sostenible), se han convertido en grandes preocupaciones para el desarrollo sostenible de la sociedad. Las actividades humanas han contaminado el medio acuático con varios metales pesados, que no son biodegradables y se acumulan en el ecosistema a través de la cadena alimentaria, causando diversos problemas de salud y enfermedades. Entre estos metales pesados, el plomo (Pb^{2+}), el mercurio (Hg^{2+}) y el cadmio (Cd^{2+}) han sido definidos como los "tres grandes" metales pesados nocivos que suponen la mayor amenaza para los seres humanos, los animales y el medio ambiente.

Por tanto, se anticipa que el uso de cenizas volantes ampliará las posibilidades de colaboración industrial como resultado del aumento en las diversas aplicaciones que pueden aprovechar los residuos de cenizas recicladas. No obstante, muchos de los enfoques mencionados aún están en las etapas iniciales de su comercialización. Se requieren investigaciones adicionales para hacer que estos hallazgos se traduzcan en una oportunidad comercial viable.

Las cenizas en suspensión se identifican mineralógicamente por la existencia de sustancias amorfas y la combinación de minerales de ferro-aluminosilicatos. Su elevado nivel de sílice y alúmina la vuelve un recurso idóneo para la creación de materiales zeolíticos de gran valor. (Gjyli et al., 2021)

Por lo expuesto, en el presente estudio utilizará cenizas volantes generados en la quema del carbón mineral de las ladrilleras ubicado en la localidad de Compañía-Huamanga-Ayacucho; en la que se utilizaran cenizas volantes de tamaño de partícula de 80 micrones previa modificación química con solución de hidróxido de sodio y dióxido de silicio; para ser utilizados en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

1.1. Planteamiento del Problema

Las cenizas volantes alrededor del mundo se producen en millones de toneladas como parte del subproducto de las plantas termoeléctricas y otras aplicaciones industriales, empleando como material combustible el carbón mineral bituminoso o antracítico. Usualmente, los subproductos de la combustión contienen más del 70% de material vítrio aluminosilicatado. Por ende, una mala gestión de las cenizas representa una fuente de peligros físicos y de contaminación del medio ambiente.

El crecimiento de la demanda de energía de cualquier país, especialmente en el caso del Perú implica el empleo de todas las fuentes energéticas disponibles; es por ello que, actualmente en muchas regiones del Perú están utilizando el carbón mineral como fuentes de energía para la industria ladrillera y de uso doméstico.

En la región de Ayacucho, actualmente la industria ladrillera ha incorporado como fuente de energía complementaria al carbón mineral, especialmente el antracítico. La localidad de compañía es un anexo del distrito de Pacaycasa que está ubicado en la provincia de Huamanga Departamento de Ayacucho, en dicho anexo se encuentra la zona

industrial ladrillera que abastece a la región. En dicha zona se ha incorporado el uso del carbón antracítico como fuente de energía, generándose aproximadamente de 280 a 300 TM de cenizas por año, producto que en la actualidad no tiene aplicación y disposición alguna.

Caviedes et al. (2015) señalan sobre los elementos metálicos lo siguiente:

“Los elementos metálicos, debido a que están presentes en los ecosistemas acuáticos a muy baja concentración, son denominados elementos traza. Algunos son nutrientes esenciales para las plantas y los animales, micronutrientes: como Manganeso, Molibdeno, Cobre, Cobalto, Zinc, Escandio y Vanadio; mientras que otros elementos como el Níquel, Estaño y Cromo, son esenciales únicamente para los animales, pero cuando estos elementos están presentes en sistemas ambientales a concentraciones superiores a ciertos niveles, debido a desequilibrios naturales o por introducción antropogénica, pueden ser tóxicos para los seres vivos”.

En los años recientes se ha puesto mayor atención a las investigaciones acerca de las formas o métodos de remover los metales pesados de los efluentes líquidos.

Por lo descrito, en el presente estudio planteamos usar las cenizas volantes generados en la industria del ladrillo en la región, previa modificación alcalina con óxido de silicio con la finalidad de elevar el área superficial, y ser evaluado como un adsorbente en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

1.2. Formulación del Problema

Ambientalmente las cenizas en general actualmente son catalogadas como residuos peligrosos, al presentar inseguridad para la salud por aspiración debido a su dimensión de partículas y por su constitución química. En consecuencia, pueden suponer un peligro para

el medio ambiente debido al contenido de metales pesados y la corrosividad. Por lo tanto, su manejo y disposición demandan tratamientos especializados.

En el presente estudio pretendemos utilizar cenizas volantes producido en las ladrilleras, como material de partida para obtener un material adsorbente y ser aplicado en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

1.2.1. Problema General

- ¿Qué condiciones son adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes, con el fin de utilizar en la retención de iones níquel (II) y plomo (II)?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Qué componentes de minerales y que valor presenta el área superficial en las cenizas volantes?
- ¿Qué condiciones de concentración son adecuadas para la solución de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio para el modificar el área de la superficie de las cenizas volantes?
- ¿Hasta qué nivel la concentración de hidróxido de sodio y la masa de óxido de silicio influyen en el incremento del área superficial de las cenizas volantes?
- ¿Qué condiciones son las adecuadas de tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando cenizas volantes modificadas?
- ¿Qué nivel de influencia tiene el tiempo y la velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) utilizando cenizas volantes modificadas?

1.3. Justificación de la Investigación

En Ayacucho se cuenta con una zona industrial en la producción de ladrillos ubicado en la localidad de Compañía-Pacaycasa-Huamanga, que abastece a casi toda la región, en

ella se generan las cenizas volantes, como componente adicional de la combustión del carbón (antracítico), el cual representa un desafío ambiental si no se gestionan adecuadamente. El uso de materiales desechados como las cenizas volantes para aplicaciones medioambientales contribuye a la sostenibilidad y a la economía circular.

Sin embargo, su utilización previa modificación química puede mejorar sus propiedades adsorbentes en la retención de contaminantes presenta una solución doble: se mitiga la contaminación por residuos industriales y lo que las convierte en un material prometedor para el tratamiento de efluentes contaminados con iones níquel (II) y plomo (II).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Determinar las condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su utilización en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar los componentes mineralógicos y área superficial de las cenizas volantes.
- Determinar las condiciones adecuadas de concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio para modificar el área superficial de las cenizas volantes.
- Determinar el nivel de influencia de la concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio en la modificación del área superficial de las cenizas volantes.
- Determinar las condiciones de tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando cenizas volantes modificadas.

- Determinar el nivel de influencia del tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando cenizas volantes modificadas.

1.5. Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

- Las condiciones adecuadas de tratamiento de las cenizas volantes permiten la modificación del área superficial para ser utilizado en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

1.5.2. Hipótesis específica

- La composición mineralógica y área superficial permiten la caracterización de la ceniza volante.
- Las condiciones adecuadas de concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio permiten la modificación del área superficial de las cenizas volantes.
- La concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio influyen en la modificación del área superficial de las cenizas volantes.
- Las condiciones adecuadas de tiempo y velocidad usando cenizas volantes modificadas permiten la retención de iones níquel (II) y plomo (II).
- Usando cenizas volantes modificadas el tiempo y la velocidad influyen significativamente en la retención de iones níquel (II) y plomo (II).

II. Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la Investigación

Pérez et al. (2025), indican que las cenizas volantes, subproducto de la combustión y gasificación del carbón, son una significativa causa de contaminación a nivel global y se categoriza como desechos peligrosos. Sin embargo, señalan que los tratamientos fisicoquímicos pueden mejorar su capacidad de adsorción aumentando su superficie. La investigación desarrollada por los autores tuvo como objetivo mejorar la capacidad de adsorción de las cenizas volantes que se originan en fabricación de ladrillos para eliminar iones Cd (II) mediante la optimización de su área superficial. El método de tratamiento fisicoquímico se elaboró considerando dos variables: la cantidad de hidróxido sódico y el tiempo de reacción, cada una analizada en tres valores diferentes. La alteración se verificó a través por análisis de DRX para evaluar su composición mineralógica. A través del método BET, las cenizas volantes antes del tratamiento mostraban una superficie de 8,59 m²/g, que se elevaba hasta un máximo de 33,99 m²/g después del procedimiento. La estrategia de modificación propuesta logró cuadruplicar efectivamente el área superficial bajo condiciones óptimas: una concentración hidróxido de sodio de 2,0 M y de tiempo 60 minutos de mezclado. El diseño factorial 3² indica que el nivel más alto de eliminación de Cd (II) es del 99,75%, logrado al usar la ceniza volante modificada con una superficie de 33,99 m²/g en condiciones operativas favorables de 30 minutos y 600 rpm.

Buzukashvili et al. (2024), en su investigación bibliográfica, mencionan que las zeolitas son minerales de aluminosilicatos con un amplio uso industrial, especialmente como adsorbentes y catalizadores en procesos comerciales. El estudio se enfoca, puntualmente, en las zeolitas sintetizadas a partir CFA, analizando sus propiedades y aplicaciones, también destacan que las actividades humanas y el desarrollo industrial generan grandes cantidades de aguas residuales contaminadas, las cuales tienen un grave impacto en los ecosistemas. Entre los contaminantes más preocupantes, señalan a los

iones metálicos, como consecuencia de su elevada toxicidad y potencial cancerígeno. Según estudios recientes, existen investigaciones enfocados en utilizar zeolitas obtenidas a partir de CFA para remover metales pesados como Ni, Hg, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr y Co tanto de soluciones sintéticas que simulan aguas residuales industriales como de efluentes reales. Según los autores, los resultados reportados en múltiples estudios analizados en esta revisión demuestran que las zeolitas son una oportunidad prometedora para la remediación de efluentes producidos en las industrias. Como conclusión, señalan que la diversidad de zeolitas sintéticas existentes representa una vía efectiva para la descontaminación de iones de metales pesados en efluentes generados en las industrias.

Ogata y colaboradores (2024), prepararon zeolita sódica (ZE) utilizando dos métodos: uno con molienda en seco (D-ZE) y otro con molienda en húmedo (W-ZE). Luego, analizaron cómo factores la concentración inicial de plomo, el pH, la temperatura, y el tiempo de contacto influían en la capacidad de estas zeolitas para adsorber iones de plomo. Determinaron que los procesos de adsorción exhiben una mayor temperatura de adsorción, un mayor pH de hasta 5,0 y un mayor tiempo de contacto. Así mismo, observaron una cinética del modelo correspondiente al orden del tipo pseudo-segundo y en cuanto a la isoterma del adsorbente de plomo verificaron que siguió los modelos de Langmuir y Freundlich. Los autores determinaron que uno de los mecanismos de adsorción analizado, permitió determinar la energía de enlace del plomo (Pb) y la distribución del plomo (Pb) antes y después de la adsorción. Finalmente concluyen que, los resultados obtenidos podrían ser útil para la adsorción de iones de plomo de soluciones acuosas utilizando muestras de zeolita sódica ZE.

Parra-Huertas et al. (2023), realizaron una investigación para obtener y caracterizar zeolitas tipo Faujasita-sódica mediante síntesis a partir de cenizas volantes (FA) como materia prima. El proceso incluyó una etapa de fusión en medio alcalino con NaOH, seguida

de un tratamiento en un reactor hidrotermal. Para analizar el producto obtenido, utilizaron diversas técnicas avanzadas como: microscopía electrónica de barrido con análisis elemental (SEM-EDX), análisis térmico diferencial y calorimetría diferencial de barrido (TGA-DTA), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD), y espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF). Según la caracterización reveló que la Faujasita-sódica fue el componente principal, con un tamaño cristalino promedio de 38,7 nanómetros y un área superficial significativa de 460 m²/g medida por el método BET. Estos resultados demostraron que el método de síntesis desarrollado fue efectivo para producir zeolitas Faujasita-sódica a partir de cenizas volantes, ofreciendo una alternativa prometedora para la valorización de este residuo industrial.

Yang et al. (2022), desarrollaron un compuesto denominado zeolita-geopolímero con un alto contenido de zeolita mediante un proceso sencillo de dos etapas, utilizando cenizas volantes y metacaolín como materias primas. Durante la síntesis, se establecieron las condiciones de operación óptimas para la cristalización de la zeolita y la solidificación del geopolímero, logrando un compuesto con un 57,5 % de zeolita tipo A y una resistencia a la compresión de 6,42 MPa. Este material mostró una estructura porosa diversa, con poros del tipo microporosos, mesoporosos y macroporosos, y una superficie específica mayor que la de la zeolita heulandita natural. Además, se evaluaron su capacidad para adsorber iones de plomo (Pb II) en solución, alcanzando un valor de 446,73 mg/g gracias a mecanismos de intercambio iónico y reacciones con grupos hidroxilo, superando ampliamente los 323,37 mg/g que presentó la zeolita heulandita natural. En conclusión, los autores sugieren que este compuesto de zeolita-geopolímero, producido mediante un método simple y eficiente, puede funcionar como un adsorbente autoportante, ofreciendo una alternativa prometedora para reemplazar las zeolitas heulanditas naturales en la eliminación de metales pesados del agua.

Jain et al. (2021), prepararon zeolita utilizando como material de partida cenizas volantes, procedentes de una planta generadora de energía, utilizando hidróxido de sodio en distintas concentraciones. El proceso se realizó mediante un método hidrotermal directo a 550 °C con un tiempo de activación de 12 horas. La zeolita sintetizada mostró una capacidad superior para eliminar metales pesados en comparación con las cenizas originales y las zeolitas naturales. En cuanto a la caracterización del material, emplearon técnicas como fluorescencia de rayos X (XRF), microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Desarrollaron estudios por lotes, analizaron cómo factores el tiempo de contacto, el pH, la cantidad de adsorbente, la concentración del metal y la temperatura que afectaban la adsorción. Descubrieron que, la eliminación de plomo estaba en función dependía principalmente del valor de pH, logrando su máximo valor de pH de equilibrio de 5,0, con una dosis óptima de 10 g/L y un tiempo de contacto de 120 minutos. Además, observaron que la adsorción aumentaba con la temperatura, indicando que el proceso es endotérmico. Al ajustar los datos experimentales a diferentes modelos de isothermas, concluyeron que la adsorción seguía mejor el modelo de Freundlich. Finalmente, lograron una eliminación máxima de plomo del 89,7 % a 25 °C, destacando la eficacia de la zeolita sintetizada para el tratamiento de aguas contaminadas.

Panek y colaboradores (2021), estudiaron dos materiales adsorbentes para metales pesados, específicamente para los iones Pb^{2+} y Zn^{2+} , a partir de soluciones acuosas: utilizaron zeolita pura (Na-X) y un compuesto de zeolita con carbono (Na-X(C)). Ambos materiales se sintetizaron utilizando cenizas volantes derivadas de la combustión convencional de carbón duro. Para caracterizar estos dos adsorbentes, aplicaron técnicas como difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido con análisis elemental (SEM-EDS), análisis de adsorción y desorción de nitrógeno, así como estudios de tamaño de partícula y composición elemental. La capacidad de adsorción se evaluó a

un pH de 5, tanto en sistemas con un solo metal como en mezclas de ambos. Los resultados mostraron que la zeolita pura tenía un área superficial mucho mayor (728 m²/g) en comparación con el compuesto de carbono (272 m²/g), y los diámetros promedio de poro fueron de 1,73 nm y 2,56 nm, respectivamente. Además, la zeolita Na-X pura demostró una mejor capacidad para adsorber metales pesados que el compuesto Na-X(C), con cantidades adsorbidas de Zn²⁺ significativamente superiores a las de Pb²⁺ (656 y 600 mg/g para Zn²⁺, frente a 575 y 314 mg/g para Pb²⁺ en Na-X y Na-X(C), respectivamente). Los autores atribuyen que los iones de zinc, de menor tamaño, intercambian cationes dentro de la estructura de la zeolita de manera más eficiente que los iones de plomo, que son considerablemente más grandes. Así mismo, en sistemas donde ambos metales estaban presentes, la competencia por los sitios activos en la superficie adsorbente redujo notablemente la cantidad adsorbida de cada metal. Finalmente, concluyen que encontraron que el ácido clorhídrico fue un agente desorbente más eficaz para ambos metales, especialmente para Pb²⁺, alcanzando una desorción del 78%, en comparación con la base de sodio, que logró una desorción máxima del 25%.

Kobayashi et al. (2020), lograron preparar zeolitas tipo K a partir de cenizas volantes (FA) y evaluaron su capacidad para adsorber iones Pb²⁺. En la parte experimental, prepararon seis variantes de zeolita denominadas FA1, FA3, FA6, FA12, FA24 y FA48, y analizaron sus propiedades fisicoquímicas, incluyendo los grupos funcionales en la superficie, la capacidad de intercambio catiónico, el pH en el punto de carga cero (pH_{pzc}), el área superficial específica y el volumen de poro. Los resultados mostraron que la cantidad de Pb²⁺ adsorbida aumentaba progresivamente en el orden FA < FA1 < FA3 < FA6 < FA12 < FA24 < FA48, indicando que la capacidad de adsorción está estrechamente relacionada con las características superficiales del material. Además, encontraron una fuerte correlación (coeficiente de 0,958) entre la cantidad de Pb²⁺ adsorbida y la liberación de iones K⁺ en la muestra FA48, lo que confirma que el intercambio iónico con potasio en la

estructura de la zeolita es clave para la eliminación del plomo en soluciones acuosas. También detectaron nuevas energías de enlace para Pb(4f) a 135 y 140 eV tras la adsorción, y observaron que FA48 mostró una selectividad notable para adsorber Pb²⁺ incluso en sistemas con múltiples cationes presentes. Finalmente, los autores concluyen que la zeolita FA48 es una opción prometedora para la remoción eficiente de iones de plomo en medios acuosos.

Liu y otros (2019), obtuvieron mediante síntesis zeolita tipo P, a través de un método hidrotermal, para ello utilizaron ceniza volante (FA) del tipo C como materia prima. Para caracterizar la zeolita obtenida, emplearon las técnicas: DRX, microscopía electrónica de barrido (SEM) y la técnica Brunauer–Emmett–Teller (BET) en la determinación del área superficial. Posteriormente, evaluaron experimentalmente la termodinámica y la cinética del proceso de adsorción de iones Cu²⁺ y Ni²⁺ por la zeolita. Los resultados mostraron que la eliminación de Cu²⁺ se ajusta mejor al tipo cinético de saturación que corresponde a segundo orden (SESSM), que describe eficazmente el proceso de intercambio iónico, entre tanto que, para el Ni²⁺, el tipo cinético empírico correspondiente a primer orden (FEKM) resultó ser el más conveniente. En cuanto a las isothermas para la adsorción, tanto los modelos de Langmuir como de Freundlich se adaptaron bien a los datos de concentración de equilibrio para ambos metales, aunque el modelo de Langmuir mostró una concordancia especialmente precisa con los valores experimentales. Finalmente, los autores concluyen que las capacidades teóricas máximas de eliminación alcanzaron 138,1 mg/g para Cu²⁺ y 77,0 mg/g para Ni²⁺, demostrando la efectividad de la zeolita sintetizada en el proceso de remoción de estos iones de metales pesados en soluciones acuosas.

Zhang et al. (2018), en su investigación utilizaron cenizas volantes de carbón procedentes de un gasificador en Jincheng-China, con la finalidad de sintetizar zeolitas mediante un proceso que combinó fusión alcalina y tratamientos hidrotermales, evaluando cómo las condiciones operativas afectaban la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del

material. La zeolita con mayor CIC (270,4 meq/100 g), caracterizada por un alto contenido de zeolita X y menor presencia de zeolita A, se obtuvo tras fusionar las cenizas con NaOH a 550 °C durante 1,5 horas, con una relación de 1,2 g/g, seguida de un tratamiento hidrotérmico de 15 horas a 90 °C y una relación: líquido/sólido de 5 mL/g. Esta zeolita fue evaluada para la eliminación de iones Ni^{2+} en agua, estudiando el tiempo de contacto, efecto del pH, concentración inicial del ion metálico y dosis de adsorbente. Los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Langmuir, y bajo condiciones óptimas, la zeolita logró remover más del 90% de Ni^{2+} . Así, los investigadores concluyen que las cenizas volantes de carbón generadas por gasificación representan una fuente económica y prometedora para producir adsorbentes eficientes en la retención de iones metálicos en agua.

Zhu et al. (2018), lograron sintetizar membranas de fibra hueca compuestas por zeolita $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaA}$ mediante un proceso hidrotermal que utilizó cenizas volantes de carbón, un residuo industrial, y soportes porosos de fibra hueca de Al_2O_3 . Para caracterizar las membranas, se emplearon técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD), confirmando la formación de la zeolita sobre los soportes. Estas membranas demostraron una notable eficiencia al eliminar iones de plomo (II) de aguas residuales sintéticas, alcanzando un 99,9 % de remoción a una presión de 0,1 MPa tras 12 horas de filtración. Además, se determinó que las membranas tienen un tamaño de poro muy pequeño, de aproximadamente 0,41 nm, lo que contribuye a su alta selectividad. Por lo tanto, concluyen que estas membranas de fibra hueca con zeolita $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaA}$ son una opción eficaz y prometedora para el tratamiento de aguas residuales con bajas concentraciones de iones plomo (II).

Cheng et al. (2018), lograron transformar residuos de cenizas volantes de carbón en materiales adsorbente altamente poroso, para eliminar nitrógeno amoniacal de aguas residuales. Este material se obtuvo mediante un tratamiento químico hidrotermal con

hidróxido, que actuó como fuente alcalina facilitando la adsorción del nitrógeno amoniacal. Para caracterizar el adsorbente, se utilizaron técnicas como microscopía electrónica de barrido, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, difracción de rayos X y análisis Brunauer-Emmett-Teller, revelando un aumento significativo en el área superficial específica, que pasó de 0,15 a 270 m²/g tras la modificación. Los autores concluyen que, las isothermas de adsorción se ajustaron adecuadamente al modelo de Langmuir, y la capacidad máxima de adsorción de nitrógeno amoniacal alcanzó 139 mg/g. Además, la información cinética se describió adecuadamente con una ecuación de orden pseudo-segundo, indicando que el intercambio iónico fue el mecanismo clave que determinó la velocidad del proceso.

Hums (2017), en su estudio analizó la formación de zeolita del tipo sodalita (SOD) como un subproducto en la síntesis de zeolita X a partir de una solución clara obtenida de cenizas volantes de carbón sudafricano fundido. Sin embargo, sus resultados indican que tanto la zeolita X como la zeolita A deben considerarse como fases intermedias, ya que es posible obtener sodalita pura al aumentar el tiempo y la temperatura de cristalización. Para ello, estudiaron la transición de las zeolitas A y X hacia la fase SOD bajo diferentes temperaturas de cristalización (70, 80 y 90 °C) y tiempos variados. Además de realizar análisis estructurales y químicos mediante difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía de plasma acoplado inductivamente (ICP), llevaron a cabo una caracterización morfológica detallada con microscopía electrónica de barrido (SEM). El autor concluye señalando que, las condiciones de cristalización influyen en las distintas morfologías cristalinas de la zeolita sodalita obtenida.

Liu et al. (2017), lograron sintetizar β -zeolita y la modificaron con etilendiamina (EDA) para mejorar su capacidad de adsorción. Ambos materiales fueron caracterizados y utilizados para eliminar níquel (II) de soluciones acuosas. A través de experimentos por lotes, estudiaron cómo factores como la temperatura influían, el pH, y el tiempo de

interacción en la adsorción de níquel sobre la β -zeolita original y la β -zeolita modificada con EDA (β -zeolita-EDA). Utilizaron espectroscopia fotoelectrónica de rayos X para analizar los datos y confirmar la formación de enlaces de coordinación entre el níquel y los adsorbentes. Los resultados cinéticos indicaron que la adsorción seguía un modelo de pseudo-segundo orden y dependía significativamente del pH. Al ajustar las isothermas correspondiente a la adsorción con los tipos de Freundlich, Langmuir, y Dubinin-Radushkevich, observaron que el proceso estaba dominado por la formación de complejos superficiales, siendo endotérmico y espontáneo. La modificación con EDA mejoró notablemente la capacidad de adsorción de níquel, lo que sugiere que este nuevo material adsorbente es una opción prometedora para eliminar níquel (II) de ambientes acuáticos y tiene potencial para aplicaciones industriales.

Visa (2016), en su estudio utilizó como materia prima cenizas volantes provenientes de dos plantas de calor y energía combinadas en Rumania (CET Brasov y DEVA) para su transformación en materiales zeolíticos. Estas cenizas las modificó mediante procesos hidrotermales con una baja concentración de NaOH para obtener los materiales deseados. Para caracterizar las zeolitas sintetizadas, la autora empleo diversas técnicas como microscopía de fuerza atómica (AFM), difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja (FT-IR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis BET, además de realizar mediciones de energía superficial, lo que le permitió describir con detalle las modificaciones cristalinas y morfológicas de los materiales. Posteriormente, estos productos zeolíticos se usó para eliminar metales pesados como Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} de soluciones sintéticas que contenían uno, dos o hasta cinco cationes simultáneamente. Para maximizar la eficiencia en la eliminación de estos metales, optimizó las condiciones de adsorción, considerando la cantidad óptima de adsorbente, el tiempo de interacción, y la concentración inicial de los metales. Además, los parámetros obtenidos las empleo para modelar termodinámica y cinéticamente los procesos de adsorción.

Finalmente, señala que el análisis detallado de la estructura, composición y morfología superficial permitió comprender mejor los mecanismos cinéticos y la capacidad de adsorción de los materiales sintetizados.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Ceniza Volantes

La norma española UNE–EN 4501:2006+A1:2008, lo define como:

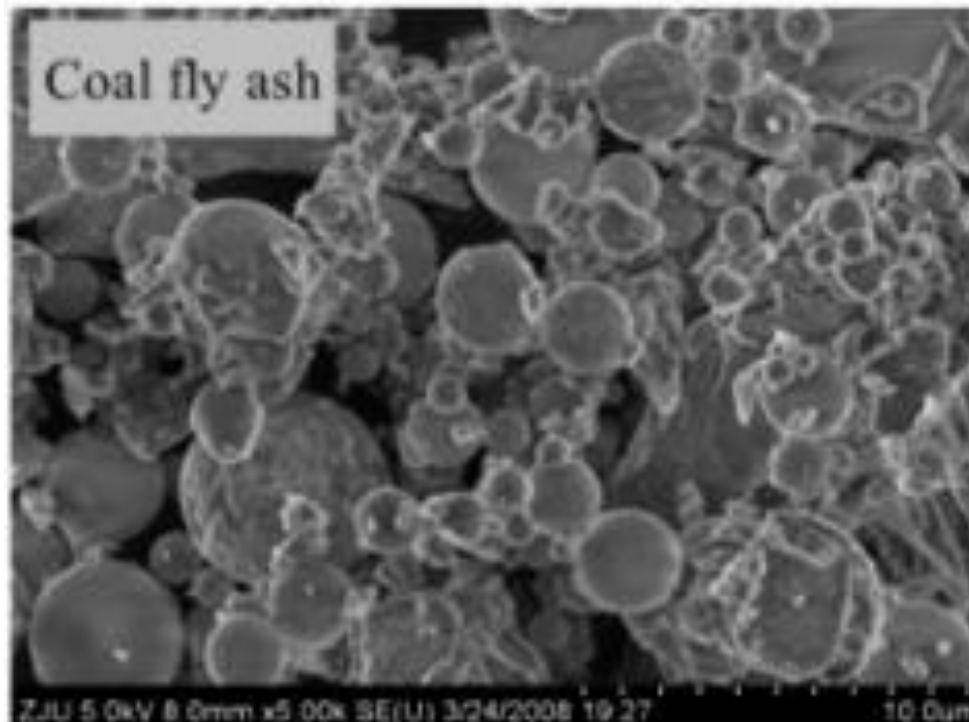
“Un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de combustión, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3). Las cenizas volantes constituyen típicamente el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a cenizas de hogar o de fondo”

El total en peso de las cenizas volantes producidas en centrales térmicas es aproximadamente del 30% de la masa de carbón consumida.

Blissett y Rowson (2012), respecto a la micromorfológica determinado por SEM (microscopía electrónica de barrido) de las cenizas volantes, como se detalla en la figura 1, en ella encontraron que las partículas de las cenizas volantes se caracterizan por presentar en forma predominante la forma esférica y están formadas por esferas sólidas, cenosferas, restos de forma irregular y carbón poroso sin quemar.

Figura 1

Microscopia electrónica de las cenizas volantes



Nota: Tomado de Blissett y Rowson (2012).

a) Propiedades Físicas

Las cenizas volantes en su condición secas se muestran como un polvo extremadamente fino, agradable al sentido del tacto y de color a un tono gris algo claro, dependiendo de la relación de carbón que no se ha quemado y de hierro. Sus propiedades y características físicas se basan en varios componentes, entre los que se destacan: la constitución química de los elementos no combustibles del carbón, el nivel de granulometría del mismo, la clase del recipiente de quemado, la temperatura de quemado, el tipo de extractor, y el procedimiento de extracción de las cenizas en la planta térmica. (Norma Técnica Española, UNE-EN-450, 2008)

La norma técnica española, UNE-EN450, señala de la ceniza volante que:

“La finura promedio de las cenizas volantes en estado bruto, es decir, sin procesar, se asemeja a la del cemento portland convencional y su tamaño de grano varía entre 0,2 y 200 micras de diámetro, alcanzando en situaciones excepcionales a cifras de 500 micras. El conjunto tiene una densidad cercana a $0,89 \text{ g/cm}^3$ y el peso específico de las partículas varía de 2,0 a $2,9 \text{ g/cm}^3$.”

b) Propiedades Químicas

La composición química de las cenizas volantes puede variar considerablemente en función de la composición química del carbón. Los porcentajes en los que se muestran los diferentes elementos de las cenizas difieren considerablemente entre sí. La Norma Española. UNE-EN, 2008, señala de las cenizas volantes que:

“En general poseen los siguientes componentes, en mayor proporción: óxido de silicio (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxidos de hierro (Fe_2O_3), cal (CaO) y carbón sin quemar; en menor proporción, generalmente menor del 5% en peso: magnesia (MgO), óxido de azufre (SO_3), alcalinos (Na_2O y K_2O), y, otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc.”

Los minerales más importantes que se suelen encontrar en las cenizas volantes son: mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), cuarzo (SiO_2), magnetita (Fe_3O_4), hematites (Fe_2O_3), wustita (FeO), goehita ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$), pirita (FeS_2), calcita (CaCO_3), anhidrita (CaSO_4), periclusa (MgO) y óxido de calcio libre (CaO). (Norma Técnica Española, UNE-EN-450, 2008)

En la tabla 1 se tiene la composición química de las cenizas volantes determinada mediante fluorescencia de rayos X (XRF) contiene principalmente un 78 % de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, mientras que las impurezas consisten en óxidos metálicos como Fe_2O_3 y CaO . (Gjyli et al., 2021)

Tabla 1*Composición química de las cenizas volantes en bruto*

Componente	% en peso
SiO ₂	50,96
Al ₂ O ₃	27,45
Fe ₂ O ₃	7,02
CaO	4,22
K ₂ O	3,34
TiO ₂	1,74
SO ₃	1,52
MgO	1,28
Na ₂ O	0,92
P ₂ O ₅	0,77
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,86

Nota: Composición determinado por fluorescencia de rayos X (XRF). Gjyli et al. (2021)

2.2.2. Adsorción

Rodríguez, (2010), con respecto a la adsorción indica:

“La adsorción en un sólido se refiere al enriquecimiento de uno o varios elementos de un fluido (gas o líquido) en la zona intermedia entre las dos etapas, la interfase: absorción, cuando el gas se infiltra en el interior del sólido; adsorción, cuando el gas se mantiene en la superficie de este. Adicionalmente afirma que, la adsorción es una técnica fascinante para eliminar compuestos orgánicos y metales de medios acuosos contaminantes, gracias a su elevada eficacia y la sencillez en el manejo de los materiales adsorbentes empleados”. (Rodríguez, 2010)

La interacción que se da entre un átomo con la superficie de un sólido, puede considerarse como un tipo de reacción química, debido a que se producen cambios, formando otros componentes, a este fenómeno se le conoce como quimisorción.

Existen otras formas de adsorción, la adsorción del tipo físico (en ocasiones referida como equivalencia fisisorción), que se origina por fuerzas intermoleculares de tipo Van der Waals. La adsorción física se produce debido a las fuerzas entre las moléculas y la superficie de la parte sólida, considerando que se da la atracción cuando la molécula no sufra una modificación significativa. (Rodríguez, 2010)

A. Isotermas de Adsorción

Rodríguez (2010), respecto a la isoterma de adsorción, indica lo siguiente:

“Cuando un volumen de gas se aproxima a la superficie de un sólido que ha sido previamente limpio, una porción del gas se adsorbe y otra queda sin adsorber. Se conoce como isoterma de adsorción a la relación entre la cantidad de gas adsorbido y la presión a la que se encuentra en equilibrio. La medición de la cantidad adsorbida puede realizarse de manera volumétrica (manométrica) o gravimétrica; en el primer caso se establece a partir de la reducción de la presión del gas a volumen constante al interactuar con el sólido, mientras que en el segundo caso se basa en el incremento de peso del adsorbente”.

La isoterma de adsorción representa el contacto entre las moléculas de gas y la superficie del sólido, proporcionando datos cruciales acerca de la zona superficial del sólido y su porosidad.

Para simplificar el contraste de resultados, la IUPAC estableció el tamaño de los poros de la siguiente manera:

” Microporos si su tamaño es menor a 2 nm; Mesoporos si las dimensiones están en el rango de 2 y 50 nm; y Macroporos si sus tamaños son superiores a 50 nm”.

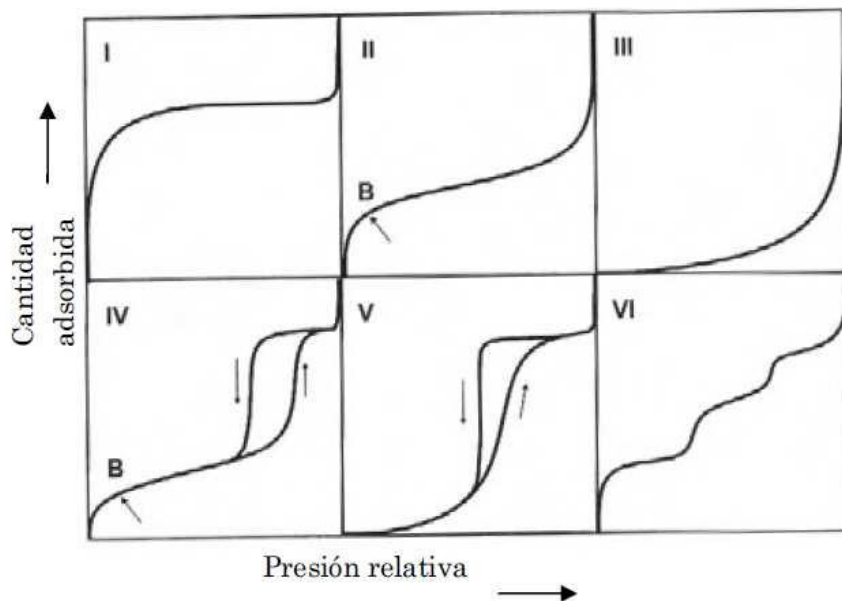
La clasificación dada por la IUPAC, está dado en seis tipos de isotermas de adsorción más comunes, se ilustran en la figura 2.

En cuanto al tipo I (que corresponde a un proceso de quimisorción, donde las moléculas se adsorben en la superficie del sólido formando una sola capa, sin

necesidad de adsorción adicional) representativo a la adsorción física en sólidos con características microporosos tal a los carbones activados, las zeolitas, entre otros. La adsorción ocurre a presiones relativamente bajas, debido al aumento de la capacidad de adsorción provocado por la cercanía de las paredes del poro. El segmento que se encuentra paralelo al eje de presiones simboliza el volumen total de los poros y evidencia la falta de poros de mayor tamaño.

Figura 2

Isotermas de adsorción según clasificación del IUPAC



Respecto al tipo II, esta referido a la adsorción en tipos de sólidos no porosos, evidenciándose tanto la generación de la monocapa adsorbida (próximo al punto B) como la posterior formación de multicapas, cuyo espesor se incrementa con la presión adicionada. En caso de que la presión iguale a la presión de saturación; por lo que la capa que se adsorbe se alinea con el componente líquido. En cuanto al tipo III, se refiere a la situación en la que existe una interacción mínima entre el gas

y el sólido, y es raro (este caso se encuentra en la adsorción carbón activado-agua). Con respecto al tipo IV, se caracteriza por tener una estrecha relación con el tipo II, y la existencia del tipo de histéresis (la desorción no se asemeja con la adsorción), se evidencia la existencia de mesoporos, cuyo proceso de llenado ocurre mediante la condensación de los capilares. Adicionalmente el tipo V tiene una relación con el III, al igual que el IV con el II. A pesar de ser poco común, el tipo VI se halla en sólidos donde la adsorción ocurre de manera capa a capa debido a que la superficie es energéticamente bastante uniforme. (Rodríguez, 2010)

B. Isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET)

Parra Soto (2013), sobre la isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET), menciona que:

“Es uno de los métodos más empleados en investigaciones de sólidos y el más empleado para determinar el área superficial específica de los sólidos. Afirman que, la ecuación BET no establece la superficie concreta, sino el volumen de vapor requerido para cubrir la superficie del sólido con una única capa de moléculas (monocapa). Así, al tener conocimiento de la densidad y el formato de empaquetado del adsorbato, se puede inferir con facilidad el área y que la ecuación BET se origina a partir de un conjunto de condiciones termodinámicas, las cuales, en teoría, limitan su uso a algunas escasas isotermas de adsorción. No obstante, su uso se ha extendido a todo tipo de isotermas y de muestras, ignorando las restricciones establecidas en el desarrollo de la teoría”. Actualmente, el método BET se utiliza de forma referencial entre distintos sólidos, no como una expresión matemática que nos permita determinar de manera "absoluta" la capacidad de la monocapa de un sólido específico. Así justificamos el uso de la expresión de BET para identificar

zonas concretas como los carbones ampliamente activados, diversas Zeolitas, entre otros, materiales que no satisfacen las restricciones de la teoría. (Parra Soto, 2013)

La expresión simple lineal de la isoterma BET es:

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{c - 1}{V_m c} \cdot \frac{P}{P_0}$$

Donde:

- P = viene a ser la presión de la sustancia gaseosa.
- V = considerado el volumen de adsorción.
- V_m = viene a ser el volumen del gas requerido para formar la monocapa en la superficie.
- P_0 = es la presión de vapor del adsorbato.
- c = viene a ser a constante a una temperatura específica.

(Parra Soto, 2013)

2.2.3. Contaminación con Metales Pesados

Visa (2016), en su trabajo de revisión bibliográfica, señala que:

“Los metales pesados son contaminantes persistentes, no biodegradables, que se acumulan fácilmente en los organismos vivos incluso en bajas concentraciones, provocando enfermedades graves. Las mayores cantidades de metales pesados se vierten directamente a los ríos, con altos riesgos de toxicidad ya que los iones hidratados son más tóxicos que los átomos de metal, porque se adsorben más rápido y alteran los procesos enzimáticos. Las principales fuentes de metales pesados en aguas residuales y aguas superficiales son: galvanoplastia y tratamiento de superficies metálicas, recubrimiento de metales y plásticos, metalurgia de aleaciones fácilmente fundibles, fabricación de baterías recargables (Ni-Cd),

industria electrónica, refinerías de petróleo, pintura y pigmentos para la industria del cuero, minería y producción de vidrio”.

Adicionalmente Kobayashi et al. (2020), respecto a los metales pesados indican que: “Ciertos metales pesados han estado y siguen contaminando el medio ambiente acuático a través de las actividades humanas, que no son biodegradables y se acumulan en el ecosistema a través de la cadena alimentaria, provocando algunos problemas de salud y enfermedades. Entre estos metales pesados, se tiene el plomo (Pb^{2+}), el mercurio (Hg^{2+}) y el cadmio (Cd^{2+}) han sido definidos como los "tres grandes" metales pesados nocivos que representan la mayor amenaza para los humanos, los animales y el medio ambiente” (Kobayashi et al., 2020).

Debido a su fuerte toxicidad, persistencia ambiental y bioacumulación, los metales pesados son muy nocivos para la salud humana, los recursos biológicos y el sistema ambiental. Por lo tanto, deben tratarse de manera efectiva antes de su descarga (Y. Liu et al., 2019)

A. Contaminación con Níquel (II)

Liu et al., (2019) respecto a la contaminación con níquel señalan que:

“El Ni (II) es uno de los metales pesados más comunes en las aguas residuales de la galvanoplastia. Se han utilizado varias tecnologías, como la precipitación, la adsorción y la electrocoagulación, para eliminar el Ni (II) de las aguas residuales de la galvanoplastia. Entre ellas, la precipitación alcalina es la tecnología más utilizada en el tratamiento de aguas residuales de la galvanoplastia debido a su tecnología madura y su funcionamiento sencillo”.

B. Contaminación con plomo (II)

Referido a la contaminación ambiental con plomo, Kobayashi et al. (2020), manifiestan que:

“Numerosos estudios han identificado previamente una relación entre la exposición al Pb^{2+} y los impactos en la salud humana, como neurotoxicidad, problemas cardiovasculares, daño renal, desequilibrios hormonales y disminución de la función musculoesquelética. El Pb^{2+} ha sido clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer como Grupo 2B, que es posiblemente cancerígeno para los seres humanos. Además, se han producido problemas con el agua potable relacionados con el Pb^{2+} en varios países. Por lo tanto, la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos han establecido contenidos máximos permisibles de Pb^{2+} para el agua potable de 0,01 y 0,015 mg/L, respectivamente. Por lo tanto, la eliminación del Pb^{2+} de los medios acuosos es un problema mundial importante.

De acuerdo con Gjiyli y colaboradores (2021), indican que varios estudios han descubierto una conexión entre la exposición al Pb^{2+} y sus implicaciones en la salud humana, incluyendo neurotoxicidad, afecciones cardiovasculares, daño renal, alteraciones hormonales y reducción de la masa muscular esquelética.

2.3.4. Difracción de Rayos X

Velandía C. y Hurtado M. (2017), respecto a la difracción de rayos X afirman que:

“Es una técnica analítica no destructiva de caracterización que identifica las fases cristalinas que pueden estar presentes en un material. Además, detecta propiedades estructurales tales como defectos estructurales, tamaño de grano, composición de fase y orientación preferencial. La difracción de rayos X es una técnica muy útil que permite el conocimiento de estructuras microscópicas detalladas de un material, y es considerada la única capaz de resolver el análisis de estructuras cristalográficas o diferenciar formas alotrópicas e isotrópicas”

En general, la difracción de rayos X es una técnica de gran importancia actualmente para determinar las diversas estructuras de los materiales y la caracterización de redes cristalográficas.

Los rayos X se caracterizan de ser radiaciones electromagnéticas de longitud de onda bajas que se genera cuando los electrones de alta energía se desaceleran o durante las transiciones de electrones que se dan en los orbitales internos de los átomos. Las longitudes de onda de los rayos X oscilan entre cerca de 10^{-5} Å y 100 Å; sin embargo, la espectroscopia de rayos X convencional se restringe a la zona de casi 0,1 Å a 25 Å (1 Å = 0,1 nm = 10^{-10} m). (Skoog et al., 2008)

La difracción de rayos X involucra una amplia diversidad de aplicaciones no solo como una técnica de investigación, sino también como una herramienta útil de tecnología.

Velandia C & Hurtado (2017) entre dichas aplicaciones de DRX, destacan lo siguiente:

“Para el análisis estructural cristalográfico y cálculos de celdas unitarias para materiales cristalinos. En la determinación cuantitativa de cantidades de diferentes fases en mezclas multifase por cálculos de relación de pico. En la determinación cuantitativa de fases por refinamiento de todo el patrón, determinación del tamaño del cristalito a partir del análisis del ensanchamiento del pico, determinación de formas cristalinas a partir del estudio de la simetría de los picos”.

Adicionalmente, es muy utilizado también, en el estudio de la expansión térmica en estructuras cristalinas utilizando equipos de calefacción. (Murcia, 2012)

Dentro de las aplicaciones diversas de la técnica de difracción de rayos X, Aparicio Ceja et al. (2010), manifiestan lo siguiente:

“La difracción de rayos X (DRX) se ha utilizado para analizar la composición de suelos e identificar minerales, aleaciones, metales, materiales catalíticos,

ferroeléctricos y luminiscentes entre otros. Este tipo de análisis se ha incorporado al estudio de materiales en el área de nanociencias, debido a que la información que arroja un difractograma ayuda a determinar la estructura cristalina y la composición de un material, e incluso, a partir de un difractograma se pueden calcular los tamaños de grano. El difractograma está formado por reflexiones (picos) que corresponden a las distancias de dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos”.

2.2.5. Diseños Experimentales

De acuerdo a Gutiérrez & De La Vara (2012), respecto al diseño de experimentos señalan que consiste en:

“Determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras”.

En el sector industrial, es habitual realizar experimentos o pruebas con el objetivo de solucionar un tipo de problema o confirmar una idea (hipótesis, suposición o conjetura), por decir realizar modificaciones en los materiales, procedimientos o situaciones de funcionamiento de un proceso, evaluar diferentes temperaturas en un tipo máquina hasta hallar la que produce el mejor resultado o examinar un nuevo material con el propósito de obtener mejoras para eliminar un problema. Usualmente estos experimentos o pruebas se realizan en tiempo real, basándose en prueba y error, recurriendo a la experiencia y a la intuición, en vez de adherirse a un plan experimental apropiado que asegure una buena respuesta a las cuestiones planteadas. La planificación estadística de experimentos es precisamente el método más eficiente para llevar a cabo pruebas.

Los siguientes son algunos problemas comunes a resolver en el diseño y análisis de experimentos:

1. Evaluar dos o más materiales para seleccionar el más adecuado.
2. Evaluar instrumentos diversos de medición para comprobar si funcionan con la misma exactitud y precisión.
3. Identificar los elementos (las incógnitas (x) vitales) en un proceso que influyen en una o varias propiedades del producto final.
4. Determinar los parámetros operativos (como humedad, velocidad, temperatura, etc.) donde se minimicen los efectos o se consiga un rendimiento superior del proceso.
5. Disminuir el ciclo de vida del proceso.
6. Hacer robusto el proceso r a las variaciones del entorno.
7. Soporte en la creación o reestructuración de nuevos productos o procedimientos.

En general, según Gutiérrez & De La Vara (2012) indican que:

“Cuando se requiere mejorar un proceso existen dos maneras básicas de obtener la información necesaria para ello: una es observar o monitorear vía herramienta estadística, hasta obtener señales útiles que permitan mejorarlo; se dice que ésta es una estrategia pasiva. La otra manera consiste en experimentar, es decir, hacer cambios estratégicos y deliberarlos al proceso para provocar dichas señales útiles. Al analizar los resultados del experimento se obtienen las pautas a seguir, que muchas veces se concretan en mejoras sustanciales del proceso”.

Así pues, el diseño de experimentos (DDE) comprende una serie de técnicas activas, que no pretenden que el proceso transmita las señales, sino que se "manipula" para que suministre la información necesaria para su mejora. (Gutiérrez & De La Vara, 2012)

2.2.6. Diseños Factoriales

En cualquier proceso de producción, en un progreso tecnológico o en la interpretación de un fenómeno, es frecuente que participen dos o más elementos. Si el entendimiento del campo requiere investigar de manera experimental los impactos de dichos factores varias variables o en una variable respuesta, es imprescindible elaborar estrategias eficaces para el análisis de dos o más factores a través de los denominados diseños factoriales. (Castaño & Domínguez, 2010)

Del mismo modo, Gutiérrez & De La Vara (2012), afirman que:

“El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes que frecuentemente tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de factores en la que el desempeño del proceso sea mejor”.

Adicionalmente, indican que:

“El propósito de un diseño factorial es analizar el impacto de diversos factores en una o varias respuestas, siempre que se mantenga el mismo interés en todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos específicos más relevantes que suele tener un diseño factorial es establecer una combinación de niveles de factores donde el rendimiento del proceso sea superior”.

Los elementos pueden ser cualitativos (maquinaria, tipos de materiales, operador, la existencia o no de una operación anterior), o cuantitativos (temperatura, humedad, velocidad, presión, la cantidad de un material específico, etc.). Para analizar el impacto de cada factor en la variable de respuesta, es imprescindible seleccionar al menos dos niveles de prueba para cada uno. Al realizar un diseño factorial completo, se examinan de manera aleatoria todas las posibles combinaciones que pueden surgir con los niveles de los factores a estudiar. (Gutiérrez & De La Vara, 2012)

A. Diseño Factorial del Tipo 2^2

El diseño factorial del tipo 2^2 estudia el efecto de dos factores considerando dos niveles en cada uno. Cada réplica de este diseño consiste de $2 \times 2 = 4$ combinaciones o tratamientos que se pueden denotar de diferentes maneras. (Gutiérrez & De La Vara, 2012)

En la tabla 2 se muestra el tratamiento del diseño factorial del tipo 2^2 , en ella se dan las notaciones que se utilizan.

Tabla 2

Tratamientos del diseño 2^2

Tratamiento	A	B	A	B	A	B
1	b	b	a_1	b_1	0	0
2	a	b	a_2	b_1	1	0
3	b	a	a_1	b_2	0	1
4	A	a	a_2	b_2	1	1

B. Diseño Factorial del Tipo 3^2

Este diseño consta de 3^2 , que resulta 9 tratamientos diferentes, que aluden a todas las posibles maneras de combinar dos factores en tres niveles cada uno. Siendo A y B los factores, cada uno con tres niveles, a los que usualmente se les llama bajo, medio y alto. Los nueve tratamientos útiles del diseño factorial del tipo 3^2 se detalla en la tabla 3.

2.2.7. Metodología de Superficie Respuesta (MSR)

Gutiérrez & De la Vara (2012), respecto a la Metodología de Superficie Respuesta, mencionan que:

“La MSR es la táctica experimental y de análisis que soluciona el desafío de determinar las condiciones de funcionamiento ideales de un proceso, o sea, las que generan "valores ideales" de una o varias propiedades de calidad del producto. En ocasiones, existen experimentos en los que no se consiguen las respuestas esperadas, o el grado de mejora alcanzado no es suficiente, por lo que se requiere experimentar de forma secuencial hasta alcanzar el nivel de mejoras requerido”.

En este contexto, después de una etapa inicial de experimentación, podría ser imprescindible trasladar la zona experimental (modificar su ubicación) en una dirección adecuada, o bien, examinar de forma más detallada la zona experimental inicial. El procedimiento para implementarlas son componentes de la conocida metodología de superficie de respuesta (MSR).

Tabla 3

Tratamientos del diseño 3²

Tratamiento	A	B	A	B
1	bajo	bajo	-1	-1
2	medio	bajo	0	-1
3	alto	bajo	1	-1
4	bajo	medio	-1	0
5	medio	medio	0	0
6	alto	medio	1	0
7	bajo	alto	-1	1
8	medio	alto	0	1
9	alto	alto	1	1

III. Materiales y Métodos

3.1. Tipo de Investigación

Tipo de investigación experimental, con enfoque cuantitativo y nivel de investigación aplicada.

3.2. Diseño de la Investigación

Se tomó muestras representativas de cenizas volantes de acuerdo a las normas técnicas de muestreo. Inicialmente fueron sometidas al proceso de tamizados para la obtención de cenizas volantes de tamaño de partícula de 80 μm , para determinar su área superficial a través del método BET; así mismo, se efectuaron ensayos de difracción de rayos X para determinar los componentes mineralógicos. Seguido, las muestras de cenizas volantes fueron alteradas químicamente en medio térmico alcalino para incrementar su área específica, para ello se utilizó el diseño factorial del tipo 2^2 , donde las variables independientes (factores) es la concentración de NaOH y la masa de óxido de silicio; siendo la variable de respuesta la elevación del valor del área superficial en m^2/g , y por último se evaluó la capacidad de adsorción de la ceniza volante modificado que presentó mayor área superficial en función del porcentaje de retención de iones níquel (II) y plomo (II) mediante el diseño factorial del tipo 3^2 ; considerando dos factores: tiempo y velocidad de retención con tres niveles para cada caso; y siendo la variable respuesta el porcentaje retención de cada ion.

3.3. Población y Muestra

La población de muestras de cenizas volantes, está en la zona industrial de ladrillos en el anexo de Compañía del distrito de Pacaycasa, cuenta con aproximadamente 90 hornos, las que se caracterizan por tener el mismo tipo del proceso de cocido de ladrillo. Se recolecto 5 kg de cenizas mediante muestreo manual con submuestras en varios puntos,

de uno de los hornos del anexo de Compañía; el cual se procedió a su tamizado para la obtención de cenizas volantes y modificación química.

En cuanto a la evaluación de la capacidad de adsorción de la ceniza volante, se dio en función del porcentaje de retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando la ceniza volante modificado de mayor magnitud de área superficial; se utilizó 0,10 g de ceniza para cada ensayo con 200 mL de soluciones de 100 ppm de iones níquel (II) y plomo (II) respectivamente.

3.4. Materiales y Reactivos

3.4.1. Materiales

- Vasos de precipitado de 250 mL de capacidad
- Matraz de erlenmeyer de 250 mL de capacidad
- Lunas de reloj de vidrio de 5 cm de diámetro
- Fiolas de 1 L de capacidad
- Embudo de vidrio de 6 cm de diámetro
- Aro de embudos de 6 cm de diámetro
- Pastillas magnéticas revestidos de teflón de 3 y 5 cm de longitud
- Botellas de teflón de 250 mL de capacidad
- Papel de filtro Whatman Cat. N° 1422145
- Botellas de vidrio de 10 mL de capacidad
- Botellas de plástico de 250 mL de capacidad
- Soporte universal

3.4.2. Reactivos

- Nitrato de níquel P.A. $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ Aldrich.
- Nitrato de plomo P.A. $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ anhidro. Aldrich.
- Óxido de silicio P.A. (SiO_2) Aldrich

- Hidróxido de sodio P.A. (NaOH) Sigma.

3.5. Equipos

En el presente estudio se contó con los siguientes equipos:

- Estufa eléctrica (MARCA: LABOR MUSZERIPARI MUVEK LP 303 HUNGARO 220 V.
- Plancha eléctrica con agitador magnético (Marca CAT, Modelo M6, Voltaje: AC 220-240 voltio, Potencia: 600W)
- Peachimetro (Marca: HACH, modelo: HQ440D, 7.7 V, I. 1 A.)
- Balanza analítica (Marca: ACCULAB, Modelo ALC-210.4, I. 800 mA, 15 V)
- Espectrómetro de emisión atómica de plasma de microondas (MP-AES), modelo 4210, marca Agilent. INIA-Ayacucho.
- El equipo Micromeritics GEMINI-VII 2390 serie t, que emplea N₂ gaseoso para el análisis y N₂ líquido como refrigerante para la condensación del N₂ gaseoso. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Difractómetro Miniflex de la marca Rigaku, con radiación de cobre a 40 Kv y 30 mA, fue utilizado para el análisis a una velocidad de barrido de 2°/minuto irradiadas. Instituto Minero Metalúrgico (INGEMMET), Lima.

3.6. Operacionalización de Variables

La tabla 4 muestra la operacionalización de las variables para el estudio en cuestión.

Tabla 4

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Valores	Indicadores	Unidades
VI: Cenizas volantes.	Las cenizas volantes; se caracterizan de ser un polvo fino, constituido especialmente por SiO ₂ y Al ₂ O ₃ , que se producen por la quema del carbón. (Norma Técnica Española, UNE-EN-450, 2008)	Utilizando DRX se determina la composición de minerales.	Caracterización de la ceniza volante	Numero de minerales	Composición mineralógica	
		Su área BET se determina con un equipo través de un software estadístico.		> 5	Área superficial	m ² /g
		Las condiciones adecuadas de la alteración química de la ceniza volante, se obtiene con el diseño factorial del tipo 2 ² .	Condiciones de concentración de NaOH y masa de óxido de silicio para la modificación.	2,0 y 3,0	Concentración de NaOH	Molaridad (M)
		El grado de influencia ide concentración de NaOH y masa de óxido se evalúa por Metodología de Superficie Respuesta.	Niveles de influencia de la concentración de NaOH y masa de óxido de silicio.	0,5 a 1,0	Masa de óxido de silicio	g
				2,0 y 3,0	Concentración de NaOH	Molaridad (M)
				0,5 a 1,0	Masa de óxido de silicio	g

<p>VD: Área superficial de las cenizas volantes alteradas químicamente.</p>	<p>Área superficial es propiedad de la superficie expuesta a una muestra sólida a la escala de nivel microscópico, sus unidades son m²/g. (Brunauer, Emmet y Teller). (Parra Soto, J., 2013)</p>	<p>La composición mineralógica se determina por DRX y la cuantificación del área superficial y su valor se halla en el equipo BET a través de un software.</p>	<p>Caracterización de la ceniza volante</p>	<p>Se Modifica-No se modifica</p>	<p>Composición mineralógica</p>	<p>N° minerales</p>
<p>Retención de iones Ni (II) y Pb (II)</p>	<p>Eliminar, disminuir, retirar parte de una concentración.</p>	<p>La concentración inicial y remanente en el proceso de retención, se determina por espectroscopia de emisión atómica de plasma (MP-AES).</p>	<p>Condiciones adecuadas de tiempo y velocidad para la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando ceniza volante modificada.</p>	<p>> 20%</p>	<p>Área superficial</p>	<p>m²/g</p>
		<p>El grado de influencia de tiempo y velocidad de agitación del proceso de retención, se evalúa por Metodología de Superficie Respuesta.</p>	<p>Los grados de influencia de tiempo y velocidad de agitación en el proceso de retención de iones níquel (II) y plomo (II).</p>	<p>Porcentaje de remoción mayor a 10 %.</p>	<p>Retención de iones níquel (II) y plomo (II)</p>	<p>ppm</p>
				<p>30 a 90</p>	<p>Tiempo</p>	<p>Minutos (min)</p>
				<p>30 a 90</p>	<p>Tiempo de agitación</p>	<p>Minutos (min)</p>
				<p>800 a 1200</p>	<p>Velocidad de agitación</p>	<p>Revoluciones por minuto (rpm)</p>
				<p>800 a 1200</p>	<p>Velocidad</p>	<p>Revoluciones por minuto (rpm)</p>

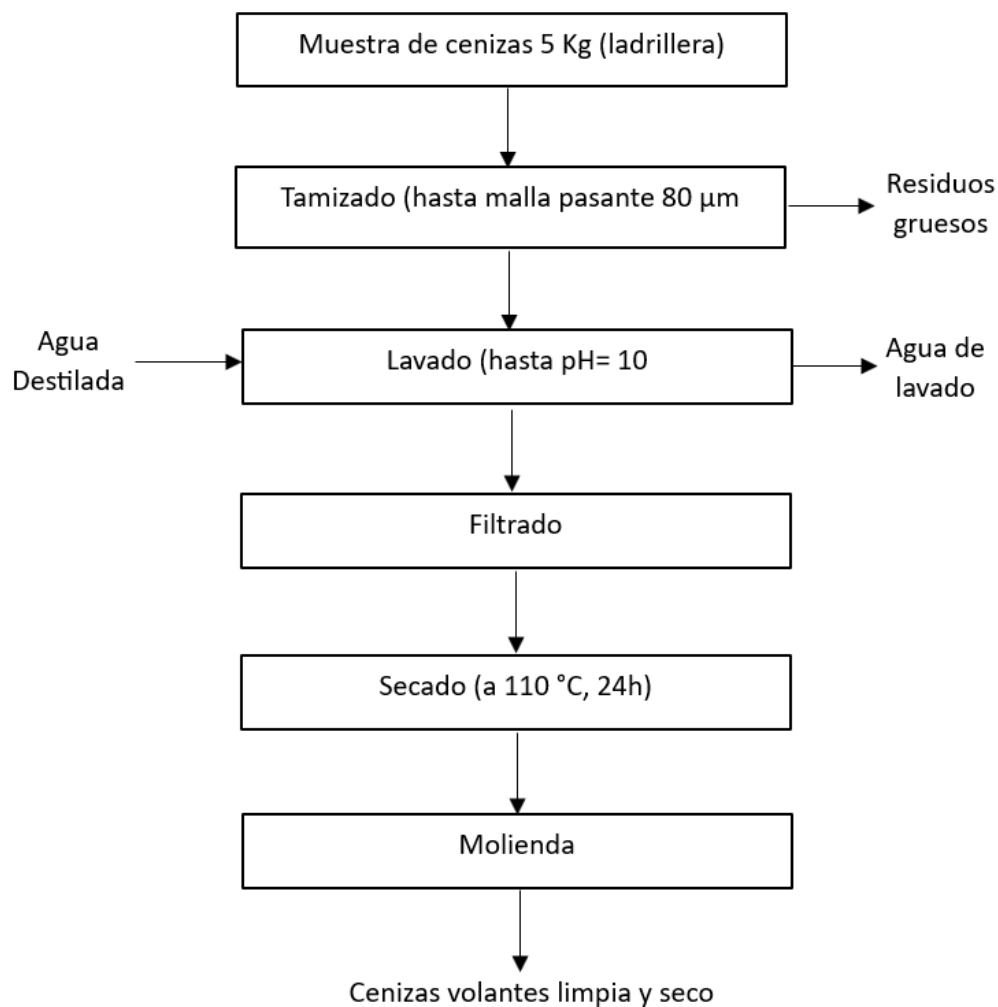
3.7. Procedimientos

3.7.1. Tratamiento de las Cenizas

- Obtenida la muestra de ceniza de una de las ladrilleras de la localidad de Compañía, esta fue sometida a un tratamiento de tamizados hasta malla pasante de 80 μm , luego se lavó hasta un pH constante de 10, filtrado, secado a 110 $^{\circ}\text{C}$ por 24 horas y se sometió al proceso físico de molido. La ceniza volante considerado para el presente estudio fue de tamaño de partículas inferiores a 80 μm . La figura 3 ilustra el diagrama de bloques del proceso de tratamiento aplicado a las cenizas para generar cenizas volantes. Toda la etapa experimental iniciando con el tratamiento de las cenizas, la modificación del área superficial y la evaluación del porcentaje de retención de iones níquel (II) y plomo (II) se realizó en el laboratorio de Fisicoquímica en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Con la finalidad de comprobar la capacidad adsorbente de las cenizas volantes en su forma inicial, se evaluó su capacidad adsorbente en la evaluación del porcentaje de retención de los iones níquel (II) y plomo (II).
- En cuanto a la medición del nivel de adsorción de la ceniza volante inicial: en un vaso de precipitado de 0,250 L de capacidad, se incorporó alrededor 0,10 g de cenizas volantes de 80 μm de tamaño de partícula, luego se adicionaron 200 mL de solución de níquel (II) y plomo (II), seguido se incorporaron en cada vaso de precipitado una pastilla magnética y se llevó al agitador eléctrico, previa regulación de la velocidad en rpm y finalmente se controló el tiempo de retención.

Figura 3

Diagrama de bloques para la obtención de cenizas volantes



En la tabla 5 y 6 se detallan los ensayos propuestos de la ceniza volante inicial para evaluar la capacidad de adsorción, en porcentaje de retención de iones níquel (II) y plomo (II) respectivamente.

Tabla 5*Ensayos propuestos para la retención de níquel (II) con ceniza volante inicial*

Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)
RNi-30-800	30	800
RNi-60-1000	60	1000
RNi-90-1200	90	1200

Tabla 6*Ensayos propuestos para la retención de plomo (II) con ceniza volante inicial*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Velocidad de agitación (rpm)
RPb-30-800	30	800
RPb-60-1000	60	1000
RPb-90-1200	90	1200

3.7.2. Modificación del Área Superficial de las Cenizas Volantes

En esta etapa de la modificación de las cenizas volantes, se utilizó el diseño factorial del tipo 2², considerando 2 variables o factores: concentración molar de NaOH y masa de óxido de silicio en gramos. La concentración de solución de NaOH fue de 2,0 M y 3,0 M; y con masas de óxido de silicio de 0,50 y 1,0 g; y de variable respuesta fue el aumento del área superficial de las cenizas volantes químicamente modificadas.

El proceso de la modificación química de las cenizas volantes presenta la siguiente secuencia:

- De acuerdo al diseño experimental 2²: se desarrolló cuatro ensayos, en cada vaso de precipitados de 200 mL de capacidad, se pesaron 20 g de cenizas volantes, se adicionaron 100 mL NaOH de concentraciones 2,0 M y 3,0 M; y masas de óxido de silicio de la marca Aldrich de 0,5 y 1,0 g según el diseño factorial considerado, siendo la proporción de masa de la ceniza volante con la solución NaOH de 1:5. Se homogenizo a 500 rpm por un tiempo de 60 min y a 70 °C.
- La mezcla de los vasos de precipitado se transvasó a las botellas de teflón (de 250 mL de capacidad), para finalmente trasladarlas a la estufa a 120 °C por 20 h para su cristalización.
- Una vez que el producto se haya cristalizado por el tiempo señalado, se dejó enfriar, luego se llevó al proceso de molienda, lavados hasta un pH final de 10, se filtra y se secó a 120 °C por intervalo de 24 horas, parámetros considerados por Boycheva et al. (2020). Culminado el secado, el producto se sometió a la etapa de molienda, con la finalidad obtener muestras representativas, para determinar los componentes mineralógicos y del área superficial. La figura 4 muestra el diagrama de bloques de la secuencia del proceso de modificación química de la ceniza volante.

La tabla 7 detalla los niveles o grados de experimentación requeridos para modificar las cenizas volantes conforme al diseño factorial del tipo 2².

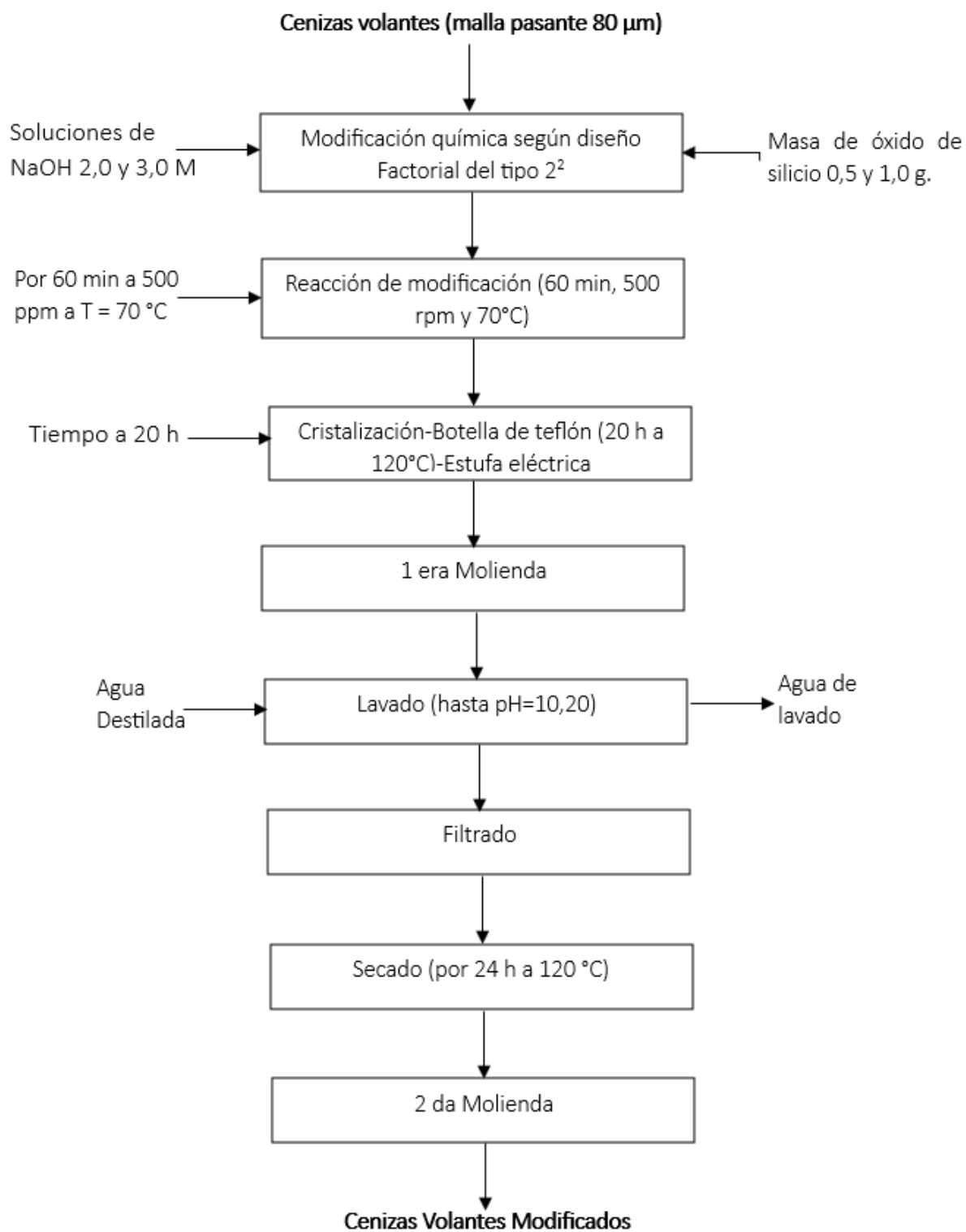
Tabla 7

Niveles experimentales en la modificación de las cenizas volantes

Factores	Bajo	Alto	Unidades
Concentración de NaOH	2,0	3,0	M
Masa de óxido de silicio	0,50	1,0	g

Figura 4

Diagrama de bloques de la modificación química de la ceniza volante



Por otro lado, en la tabla 8 se tiene los niveles experimentales de distribución para la modificación de las cenizas volantes según el diseño factorial 2^2 .

Tabla 8

Niveles experimentales de combinación en la modificación de las cenizas volantes

Ensayo	Nomenclatura	[NaOH] (M)	Masa SiO ₂ (g)
1	CVM-A	2,0	0,50
2	CVM-B	2,0	1,0
3	CVM-C	3,0	0,50
4	CVM-D	3,0	1,0

3.7.3. Retención de iones Níquel (II) y Plomo (II) con Cenizas Volantes Modificadas

Para ambos casos, la retención de iones Ni (II) y Pb (II) se realizan en sistemas del tipo batch, en esta evaluación se utiliza la ceniza volante modificada con elevada área superficial. Para cada caso se prepararon 4 L de soluciones Ni (II) y Pb (II) de 100 ppm de concentración inicial, con reactivos de Ni(NO₃)₂ y Pb(NO₃)₂ (P. A.) ambas de la marca Aldrich. Para la evaluación del grado de adsorción de las cenizas volantes modificadas, se da en función del % de retención de los iones níquel (II) y plomo (II) utilizando el diseño factorial del tipo 3^2 , con dos variables independientes: tiempo y velocidad de retención con tres niveles cada uno y como variable de respuesta el porcentaje de retención de iones níquel (II) y plomo (II).

La evaluación del nivel de retención de níquel (II) y plomo (II) tiene la siguiente secuencia:

- En matraces de erlenmeyer de 0,25 L de capacidad se introdujeron 0,1 g de ceniza modificada, seguido se añadió 200 mL, tanto de las soluciones de níquel (II) y de plomo (II) de 100 ppm, la relación masa de ceniza volante modificada con el volumen es de 1:2000.
- Los matraces con la mezcla preparada, se llevaron al agitador, inmediatamente se introdujeron las pastillas magnéticas, se reguló la velocidad de agitación según al diseño experimental seleccionado y se controló el tiempo de retención.
- Los ensayos de retención se realizaron a temperatura ambiente, en el proceso de la retención de iones níquel (II) y plomo (II) se controló el pH inicial y final de cada ensayo.
- Luego del proceso de retención de los iones metálicos se procedió a filtrar, se utilizó papel de filtro de la marca Whatman Cat. N° 1422145, simultáneamente las soluciones restantes se recibieron en frascos exclusivos de material de vidrio para la determinación de la concentración.

Los niveles de experimentación para los iones níquel (II) y plomo (II) según al diseño factorial del tipo 3^2 se indican en la tabla 9.

Tabla 9

Niveles experimentales para la retención de iones níquel (II) y plomo (II)

Factores	Bajo	Medio	Alto	Unidades
Tiempo	30	60	90	min
Velocidad	800	1000	1200	rpm

Por otro lado, los niveles de combinación experimental para la remoción de iones níquel (II) y plomo (II) de acuerdo al diseño factorial del tipo 3^2 se detallan en la tabla 10 y 11.

Tabla 10

Niveles de combinación experimental para la retención de iones níquel (II)

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)
1	RNi-1	90	1200
2	RNi-2	30	1200
3	RNi-3	30	800
4	RNi-4	90	1000
5	RNi-5	60	1200
6	RNi-6	30	1000
7	RNi-7	60	1000
8	RNi-8	60	800
9	RNi-9	90	800

Tabla 11*Niveles de combinación experimental para la retención de iones plomo (II)*

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)
1	RPb-1	60	1000
2	RPb-2	90	1200
3	RPb-3	30	1000
4	RPb-4	30	800
5	RPb-5	90	800
6	RPb-6	60	800
7	RPb-7	30	1200
8	RPb-8	60	1200
9	RPb-9	90	1000

3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La técnica de recolección de datos para este estudio es con enfoque cuantitativo, se obtuvieron resultados numéricos que cuantifican una propiedad medible. Para la recolección de datos se utilizará el programa Microsoft Excel.

3.9. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Para el estudio, se tomó en consideración el diseño experimental factorial del tipo 2^2 y 3^2 , que se caracteriza por la evaluación de dos factores (variables independientes) y las interacciones que podrían darse entre los factores. Se evaluaron dos variables independientes en la modificación; así mismo, dos variables independientes para la evaluación de la retención de iones níquel (II) y plomo (II); adicionalmente se utilizó el

programa Microsoft Excel como técnica de procesamiento de datos y para el análisis de datos se utilizó la Metodología de Superficie Respuesta con el paquete estadístico STATGRAPHICS XVIII.

IV. Resultados

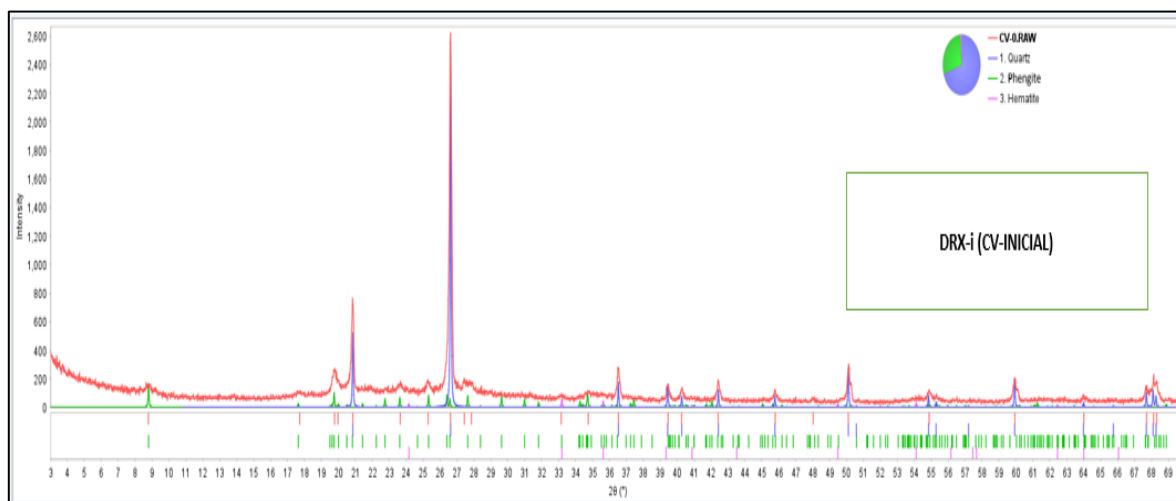
4.1. Caracterización Inicial de la Ceniza Volantes

Una vez tratada la muestra de ceniza obtenida del horno, según lo descrito en la figura 4, se logró obtener 5,57 % en masa de cenizas volantes de malla pasante de 80 μm .

Según los resultados por difracción de rayos X de la ceniza volante en la condición inicial como se visualiza en la tabla 14; en ella se evidencia que presenta tres componentes como parte de su composición mineralógica: el primero con 92,23 % en masa de cuarzo (óxido de silicio- SiO_2), el segundo Fengita ($\text{K}_{0,95}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,20}\text{Fe}_{0,28}\text{Al}_{2,27}\text{Si}_{3,25}\text{O}_{10}(\text{OH})_{1,96}\text{F}_{0,04}$) con 5,83 % y el tercero con 1,94 % de Hematita (Fe_2O_3). Los difractogramas completos de las demás muestras de la investigación se reportan en el anexo 10.1 y 10.2. En la figura 5 se visualiza el difractograma de la ceniza volante en su condición inicial. La ceniza volante inicial presenta dos picos muy típicos en 2θ espaciado a 21° y $26,5^\circ$ perteneciente al cuarzo (SiO_2), adicionalmente el mineral Fengita como fase cristalina se identifica en 2θ igual a $8,8^\circ$ y en $19,6^\circ$, y hematita en 2θ a 33° .

Figura 5

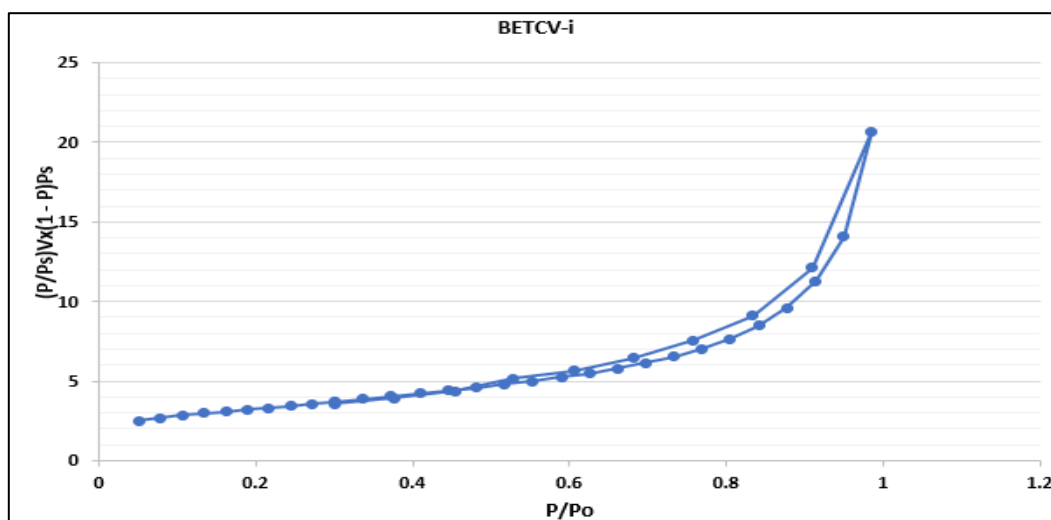
Difractograma de la ceniza volante inicial (DRX-i)



Por otro lado, en la figura 6 se visualiza la isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante inicial (BETCV-i), material que se caracteriza por tener superficie micro mesoporosa, con prevalencia de mesoporosidad y de poro cilíndrico. Para la ceniza volante en su condición inicial por el método BET se determinó $11,41 \text{ m}^2/\text{g}$ de área superficial.

Figura 6

Isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante inicial



Respecto a la evaluación del nivel de adsorción de la ceniza volante inicial, expresado en el porcentaje de retención de iones Ni (II) y Pb (II), en la tabla 12 y 13 están descritos los resultados del porcentaje de retención para ambos casos.

Tabla 12

Resultados de la retención de iones níquel (II) usando ceniza volante inicial

Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	% retención de iones níquel (II)
RNi-30-800	30	800	5,69
RNi-60-1000	60	1000	5,80
RNi-90-1200	90	1200	3,95

Nota: RNi, indica retención de iones níquel (II)

Tabla 13

Resultados de la retención de iones plomo (II) usando ceniza volante inicial

Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	% retención de iones plomo (II)
RPb-30-800	30	800	17,51
RPb-60-1000	60	1000	17,15
RPb-90-1200	90	1200	17,15

Nota: RPb; indica retención de iones plomo (II)

De acuerdo a los resultados reportados en la tabla 12 y 13, respecto a la capacidad de adsorción de la ceniza volante en su condición se confirma que tiene propiedades adsorbentes, siendo de 5,15 % en promedio de retención de iones níquel (II) y de 17,27 % en promedio de retención de iones plomo (II).

4.2. Modificación de las Cenizas Volantes

4.2.1. Composición Mineralógica

Efectuada la modificación química de las cenizas volantes, en la tabla 14 se reportan los resultados de la composición mineralógicos de la ceniza volante inicial (DRX-i) y

modificadas (DRX-A al DRX-D). Los resultados íntegros de las muestras tratadas de DRX se encuentran en el anexo 10.1 reportado por INGEMMET-Lima.

Los difractogramas de las muestras de las cenizas modificadas (DRX-A al DRX-D) se presentan en las figuras comprendidas del 7 al 10.

Tabla 14

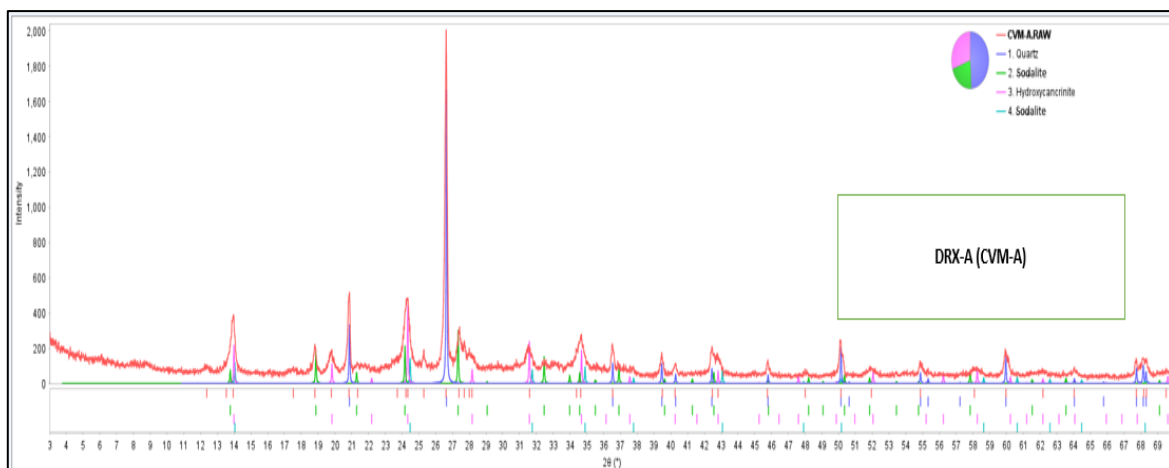
Composición mineralógica de la ceniza volante inicial y modificadas

Componente	Componentes mineralógicos en % en masa				
	DRX-i	DRX-A	DRX-B	DRX-C	DRX-D
Cuarzo	92,23	65,35	74,49	52,45	62,99
Sodalita		22,84	10,32	37,06	31,49
Fengita	5,83		6,10	6,29	5,52
Cancrinita	-	-	-	4,20	-
Hidroxicantrinita	-	11,81	-	-	-
Hematita	1,94	-	-	-	-
Zeolita	-	-	9,18		
N° de minerales	3	3	4	4	3

De acuerdo a la tabla 14 de la composición mineralógica, se evidencia que la muestra DRX-A contiene tres componentes, con la formación de dos fases cristalinas (sodalita con 22,84 % en masa y con 11,81 % de hidróxicancrinita). El difractograma de la figura 7 perteneciente a la muestra modificada DRX-A, se visualiza la formación de dos nuevas fases cristalinas; hidróxicancrinita que la identifican con 2θ en 14° ; $24,5^\circ$; $31,5^\circ$ y en $34,5^\circ$; y sodalita con 2θ típicas en $18,8^\circ$; $24,3^\circ$ y $27,5^\circ$.

Figura 7

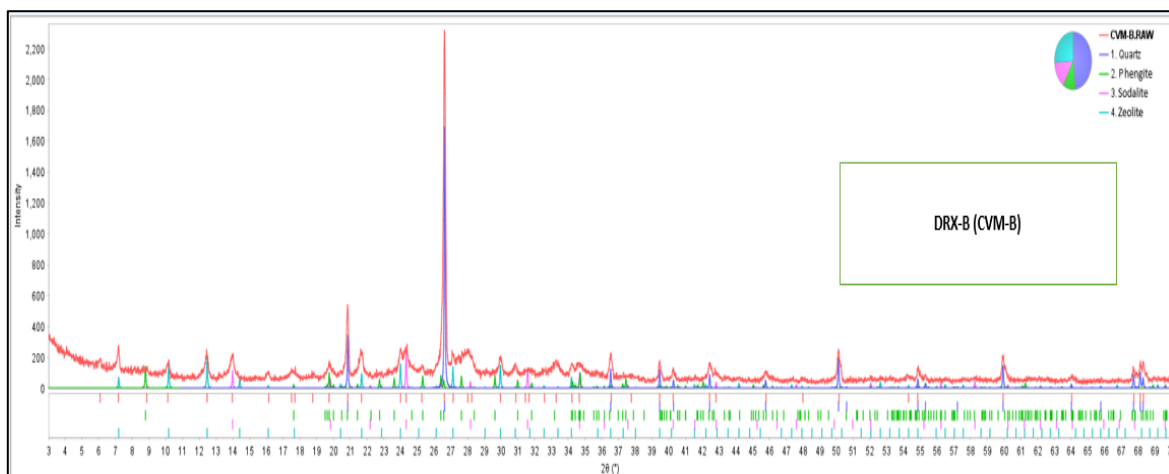
Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-A



En cuanto a la muestra DRX-B, se evidencia la generación de dos nuevas fases cristalinas (sodalita con 10,32 % en masa y zeolita con 9,18 %). La figura 8 muestra el difractograma de la muestra DRX-B, en la que se corrobora la formación de las nuevas fases cristalinas en 2θ que la identifican, caso de la sodalita en 14° y $24,3^\circ$ y para la zeolita en 10° y $12,5^\circ$.

Figura 8

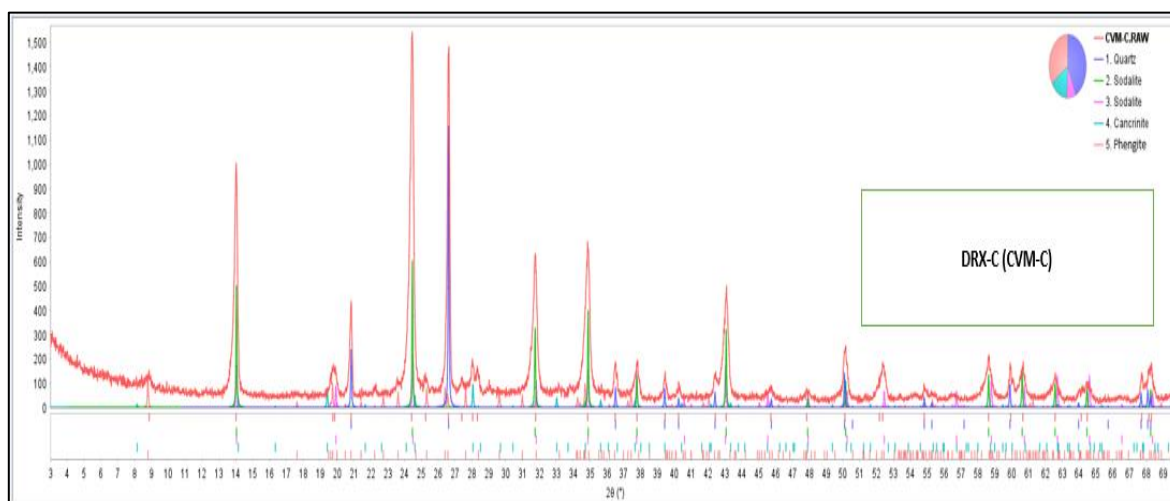
Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-B



Para la muestra DRX-C similar al anterior, también se forma dos nuevos componentes cristalinos (sodalita con 37,06 % en masa y con 4,20 % de cancrinita), que se evidencia en la figura 9, ambas identificadas con 2θ en 28° para la cancrinita y en $24,3^\circ$; 32° ; 35° y 43° para la sodalita.

Figura 9

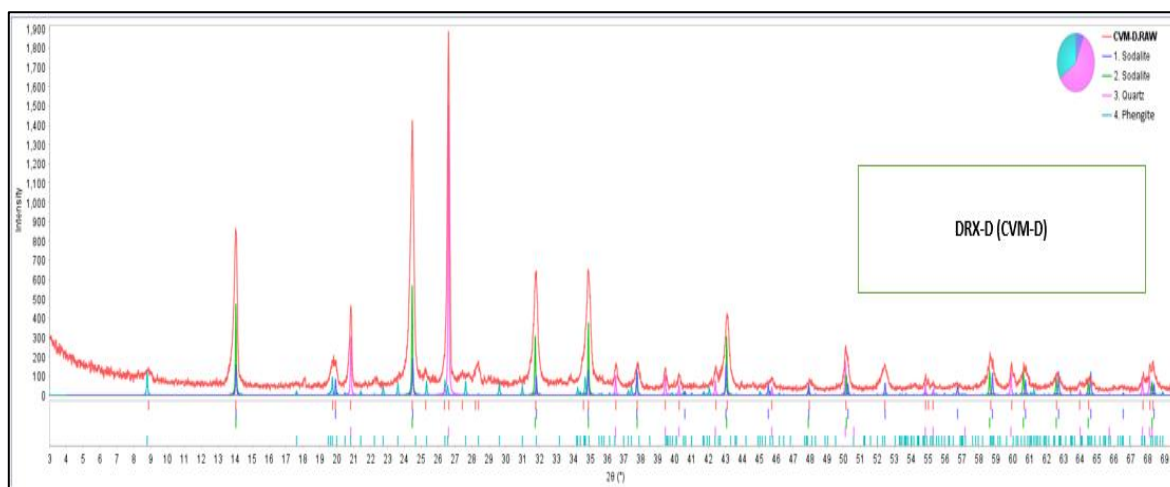
Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-C



El difractograma DRX-D se observa en la figura 10, que de acuerdo a la tabla 11 se observa que solo se generó un nuevo componente adicional, la sodalita con 31,49 % en masa, con 2θ típico en 14° ; $24,3^\circ$; 32° ; 35° y 43° .

Figura 10

Difractograma de la ceniza volante modificada DRX-D



4.2.2. Área Superficial de las Cenizas Modificadas

En esta parte, la variable respuesta en la modificación de las cenizas volantes es el aumento del área superficial. En la tabla 15 se detallan los valores del área superficial determinados por el método BET (Brunauer-Emmett-Teller) de la modificación química de las cenizas volante acorde al diseño experimental 2². En la mencionada tabla 15, se evidencia que el valor más elevado de área superficial le corresponde a la muestra **BETCVM-B**, con 17,60 m²/g a condiciones adecuadas de 2,0 M de concentración de NaOH y 1,0 g de óxido de silicio. Los resultados del área superficial por el método BET se presentan en el anexo 10,3.

Tabla 15

Resultados del área superficial de las cenizas volantes modificadas

Muestra	[NaOH] (M)	Masa de SiO ₂ (g)	Área superficial (m ² /g)
BETCVM-A	2,0	0,50	12,25
BETCVM-B	2,0	1,0	17,60
BETCVM-C	3,0	0,5	6,55
BETCVM-D	3,0	1,0	8,41

Nota. BETCVM-A, significa área superficial de la muestra A

Las isotermas de adsorción y desorción de las cenizas modificadas según el diseño factorial del tipo 2², se visualizan en las figuras comprendidas del 11 al 14. Así mismo, se determinó que las muestras modificadas se encuentran clasificados en la isoterma de adsorción de gases correspondiente al tipo IV como se evidencia en la figura 2 de la

clasificación dado por el IUPAC, clasificado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC-1985), con características de superficie micro mesoporosa, con prevalencia de mesoporosidad de poro laminar para las muestras BETCVM-A y BETCVM-B; y de poro cilíndrico para las muestras BETCVM-C y BETCVM-D.

Figura 11

Isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-A

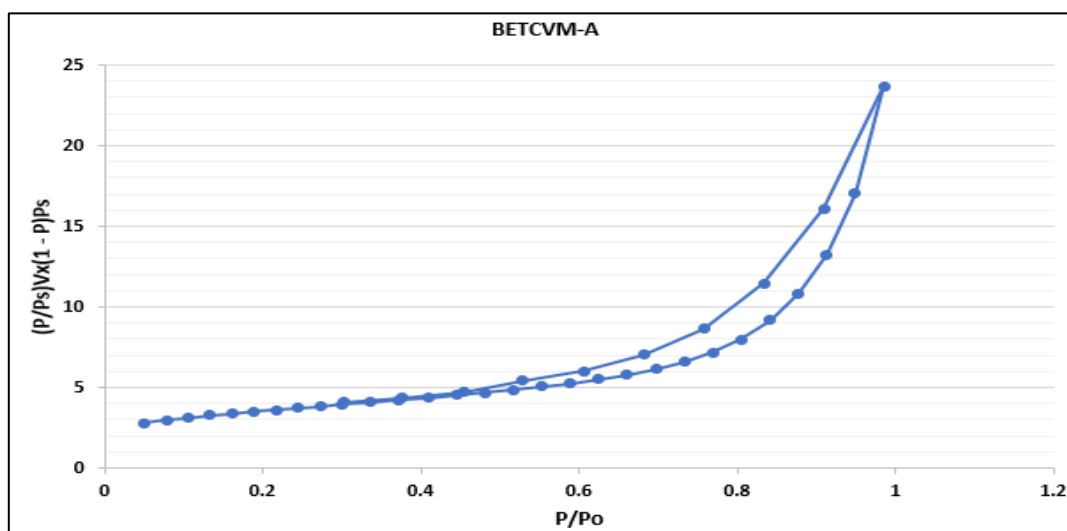


Figura 12

Isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-B

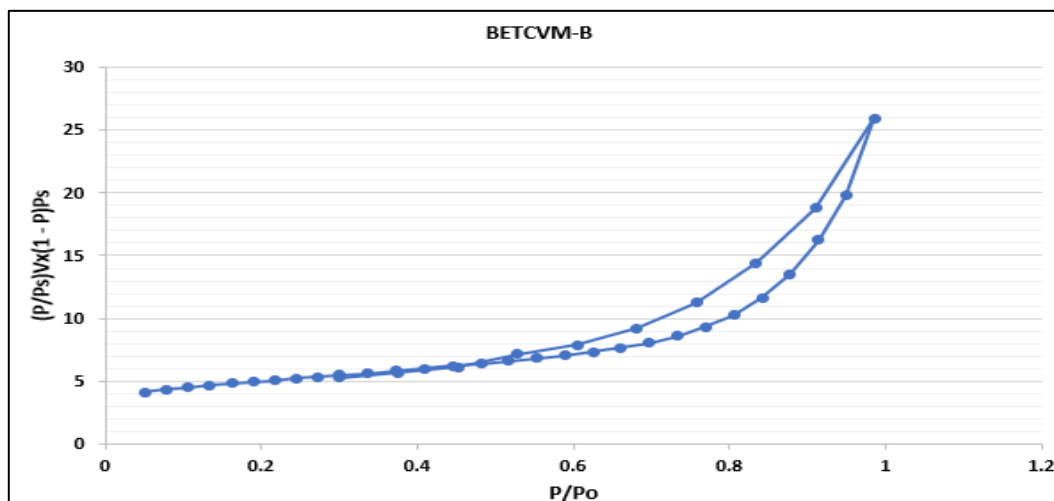
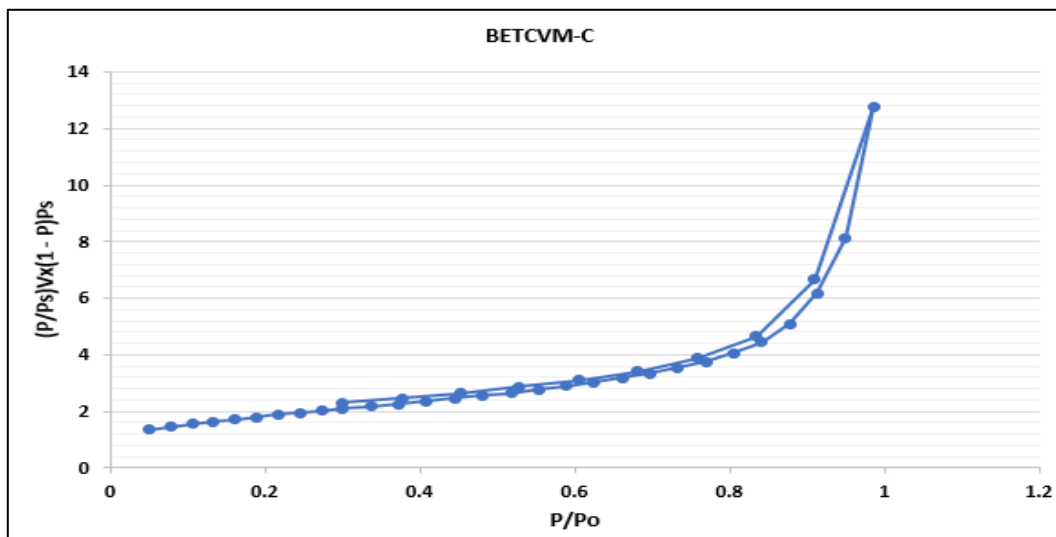
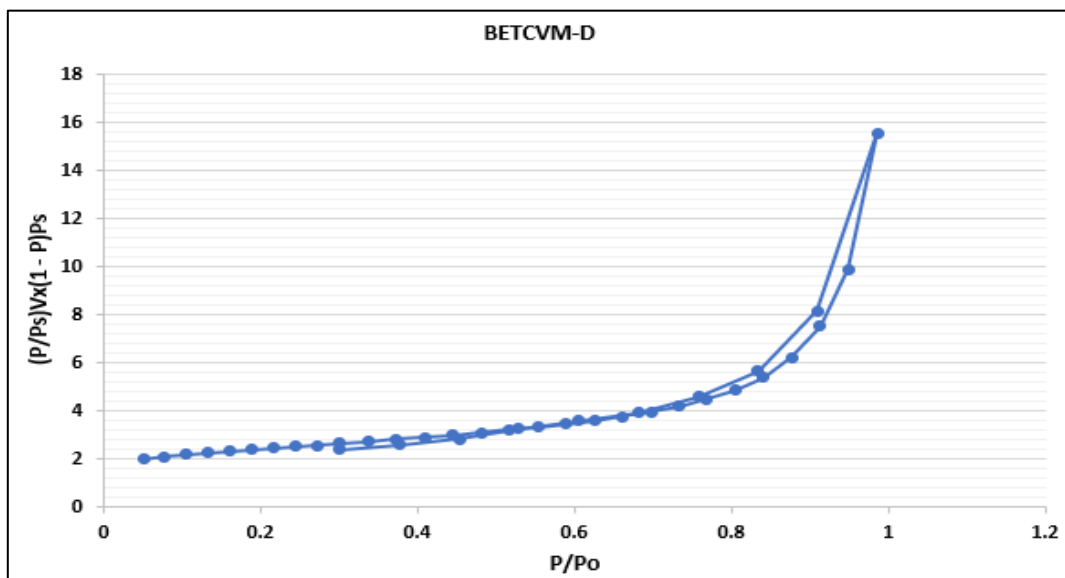


Figura 13

Isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-C

**Figura 14**

Isoterma de adsorción y desorción de la ceniza volante modificada BETCVM-D



4.3. Influencia de la Masa de Óxido de Silicio y Concentración de NaOH

En cuanto al nivel de influencia de las variables independientes, masa de óxido de silicio y concentración de NaOH en la modificación de las cenizas volantes; aquí se considera como variable respuesta el aumento del área superficial de las cenizas modificadas, dentro de ello se evaluó la optimización y otros efectos, todo ello se logró evaluar por el método de superficie respuesta (MSR), que a continuación se describe.

4.3.1. Análisis de Varianza en el Aumento del Área Superficial

En la tabla 16 se presentan los resultados del análisis de variabilidad relativo al aumento del área superficial de las cenizas volantes modificadas, analiza la división de la variabilidad en el aumento del área superficial. En estas circunstancias y de acuerdo al diseño experimental utilizado, no se cuenta con resultados del p-valor.

Tabla 16

Análisis de variabilidad para el aumento del área superficial

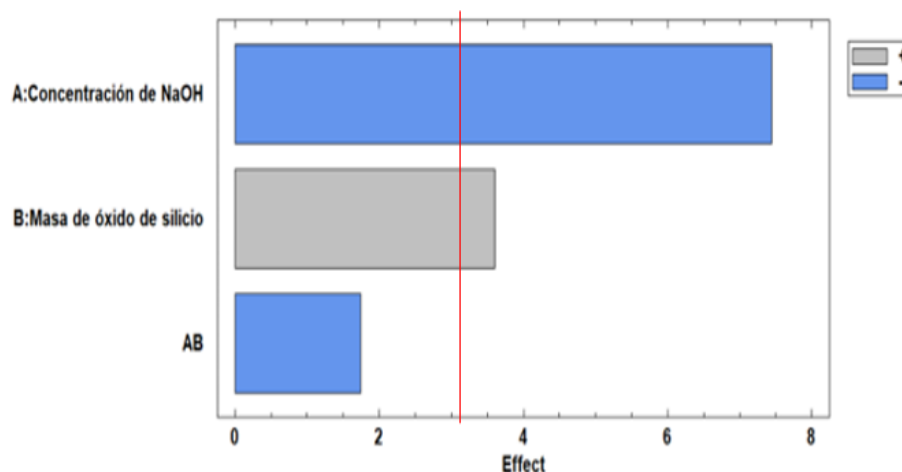
Fuente	Suma de cuadrados	G _l cuadrado	Cuadrado medio
A: Concentración de NaOH	55,428	1	55,428
B: Masa de óxido de silicio	12,996	1	12,996
AB	3,045	1	3,045
Error Total	0,0	0	
Total (corr.)	71,4691	3	

Desde una perspectiva estadística, el R-Cuadrado indica que el modelo, después de ser ajustado, revela que el 100 % es una variable que se relaciona con el aumento del área de la superficie.

Por otro lado, según la figura 15 en ella se tiene el diagrama estándar de Pareto respecto al aumento del área superficial de las cenizas modificadas. En este gráfico se validan los hallazgos de ANOVA respecto al nivel de significancia de las dos variables (concentración de NaOH y masa de óxido de silicio), las cuales exceden 3,20 en la línea vertical que indica el nivel de significación.

Figura 15

Diagrama de Pareto estándar para el aumento del área superficial



En la tabla 17 se explican los efectos aproximados de cada una de las interacciones calculadas en el aumento del área superficial de las cenizas volantes alteradas, donde se observan las interacciones de las variables independientes en relación con el aumento del área superficial.

De acuerdo a la tabla 17, se observan las siguientes características: la variable independiente de concentración de NaOH para la elevación del área superficial tiene efecto negativo de -7,445; la variable masa de óxido de silicio expone efecto positivo de 3,605; la interacción concentración de NaOH con masa de óxido de silicio manifiesta efecto negativo de -1,745; sin embargo, es necesario aclarar que, se considera el valor absoluto para

señalar el verdadero efecto de la variable. La variable concentración de hidróxido de sodio presenta mayor efecto en el aumento del área superficial de la ceniza modificada.

Tabla 17

Efectos aproximados para el aumento del área superficial

Efecto	Estimado
Promedio	11,2025
A: Concentración de NaOH	-7,445
B: Masa de óxido de silicio	3,605
AB	-1,745

4.3.2. Coeficientes de Regresión para el Aumento del Área Superficial

En la tabla 18 se reportan los coeficientes numéricos de regresión para la variable respuesta, aumento del área superficial de las cenizas volantes modificadas.

Tabla 18

Coeficientes de regresión para el aumento del área superficial

Coeficiente de regresión	Estimado
Constante	11,32
A: Concentración de NaOH	-2,21
B: masa de óxido de silicio	24,66
AB	-6,98

La fórmula de regresión para el aumento del área superficial, basada en la información del diseño experimental, se configura de la siguiente manera:

$$y = 11,32 - 2,21x_1 + 24,66x_2 - 6,98x_1x_2$$

Dónde:

y: aumento del área superficial.

x_1 : concentración de NaOH.

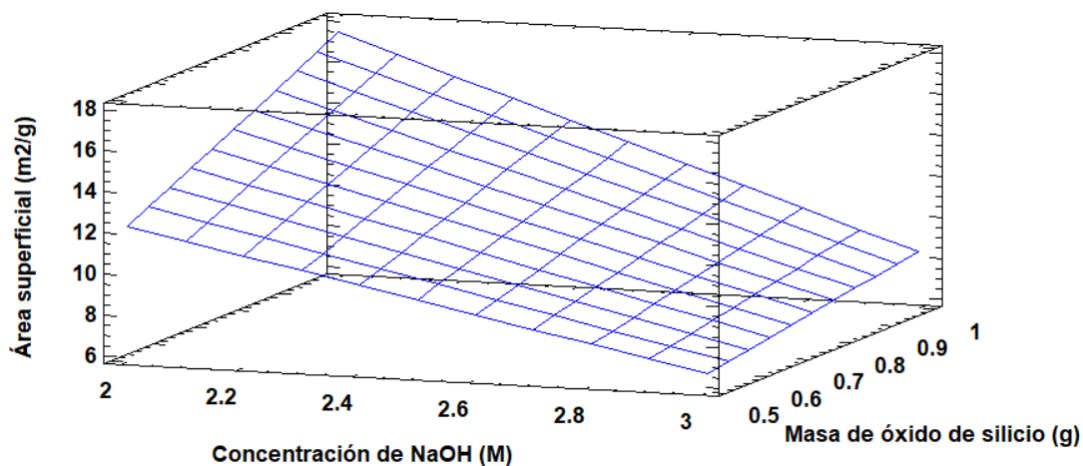
x_2 : masa de óxido de silicio.

4.3.3. Superficie Respuesta para el Aumento del Área Superficial

En la figura 16 se presenta tridimensionalmente el diagrama de superficie respuesta del aumento del área superficial de las cenizas volantes modificadas.

Figura 16

Diagrama de superficie de respuesta para el aumento del área superficial



4.3.4. Gráfica de Contornos para el Incremento del Área Superficial

La magnitud óptima de concentración de NaOH y masa de óxido de silicio para el aumento del área superficial de las cenizas modificadas se muestran en la tabla 19.

Tabla 19

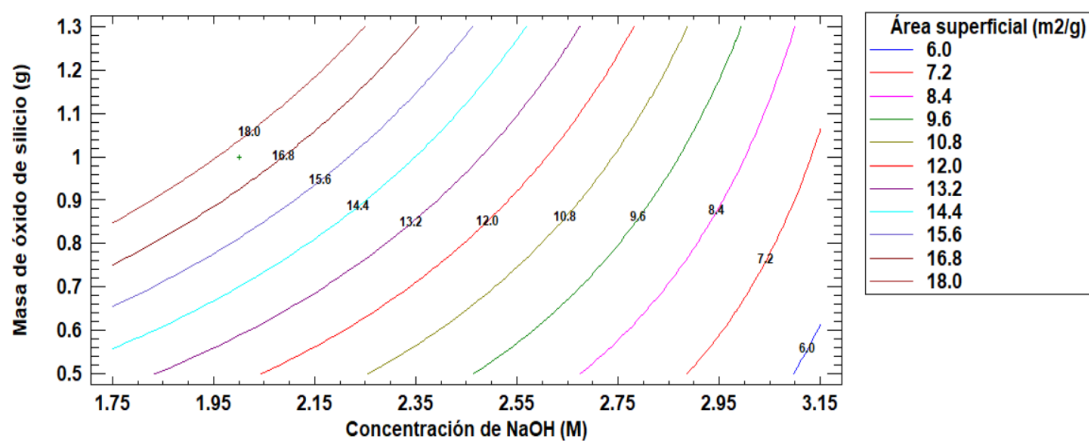
Respuesta optimizada para el aumento del área superficial

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Concentración de NaOH (M)	2,0	3,0	2,0
Masa de óxido de silicio (g)	0,5	1,0	1,0

La imagen de contornos proyectada para el aumento del valor del área superficial de las cenizas volantes tratadas se muestra en la figura 17, donde se destaca el punto más alto del aumento del área superficial.

Figura 17

Gráfica de contornos proyectada para el aumento del área superficial



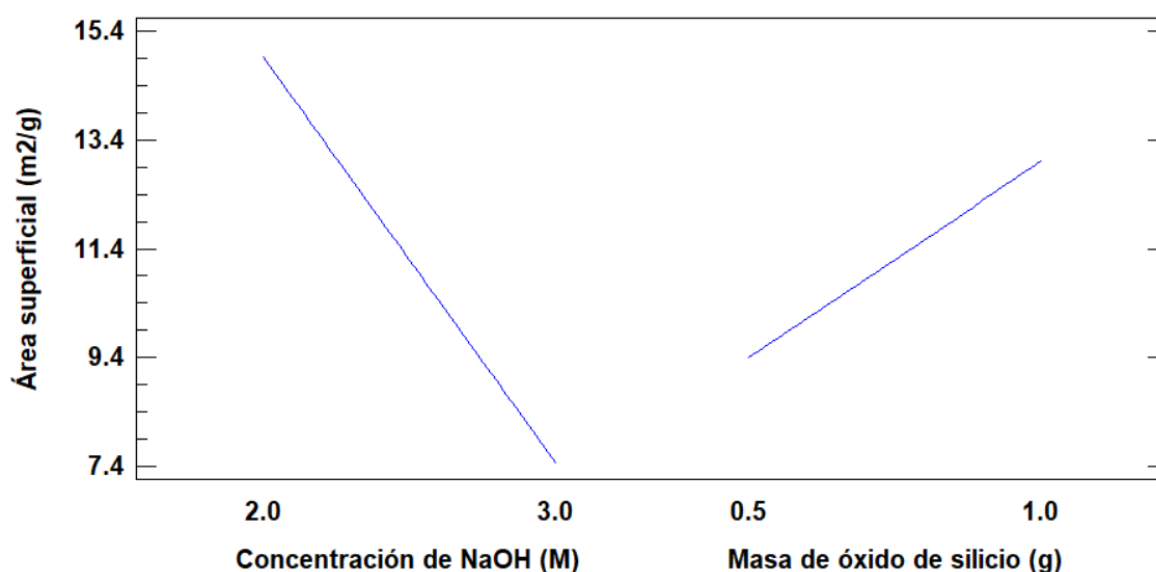
Las condiciones óptimas en el proceso de alteración de las cenizas volantes fueron: una concentración de NaOH de 2,0 M, una cantidad de óxido de silicio de 1,0 g y un área superficial de 17,60 m²/g.

4.3.5. Influencia de la Masa de Óxido de Silicio y Concentración de NaOH

La figura 18 presenta el gráfico que ilustra el efecto (influencia) de la cantidad de óxido de silicio y de la concentración de NaOH en el aumento del área superficial de las cenizas volantes modificadas.

Figura 18

Influencia de la masa de óxido de silicio y concentración de NaOH para el aumento del área superficial



De acuerdo a la figura 18, significa que a concentraciones mayores de 2,0 M de NaOH no presenta influencia positiva en el incremento del área superficial de las cenizas volantes. Sin embargo, la influencia podría cambiar a concentraciones inferiores a 2,0 M de NaOH. Por otro lado, la variable independiente masa de óxido de silicio, si presenta influencia en forma lineal ascendente en el aumento del área superficial de las cenizas modificadas.

4.4. Retención de Iones Níquel (II)

Realizada la modificación de las cenizas volantes, en esta etapa de evaluación de la capacidad de retención de iones níquel (II) y de plomo (II), se utilizó la muestra de ceniza volante de mayor área superficial, el cual corresponde a la muestra BETCVM-B con 17,60 m²/g de área superficial. En la tabla 20 se reportan los resultados de la retención de iones níquel (II) según el diseño factorial 3².

Tabla 20

Resultados de la retención de iones níquel (II) según el diseño factorial 3²

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	% retención de iones Ni (II)
1	RNi-1	90	1200	12,12
2	RNi-2	30	1200	10,45
3	RNi-3	30	800	15,13
4	RNi-4	90	1000	9,48
5	RNi-5	60	1200	15,64
6	RNi-6	30	1000	16,50
7	RNi-7	60	1000	11,10
8	RNi-8	60	800	13,11
9	RNi-9	90	800	11,51

Nota. RNi-x, indica retención de iones níquel (II) de la muestra x

En la tabla 20 se evidencia que el nivel más alto de retención de iones níquel (II) se da en la muestra **RNi-6** con **16,50 %** de retención bajo condiciones de 30 minutos y con una velocidad de 1000 rpm. Los resultados de la cuantificación del proceso de evaluación de la capacidad de adsorción, referidos a la concentración inicial y final de los iones

metálicos se reportan en el anexo 10.4; emitido por el laboratorio de suelos, aguas y foliares (LABSAF) INIA-Ayacucho.

El pH inicial de los iones níquel (II) fue de 5,44; y el pH promedio luego del proceso de la retención fue de 6,72. En el anexo 10.5 se presentan resultados calculados de la determinación de los porcentajes de retención níquel (II) y plomo (II) y los valores de pH para cada ensayo realizado.

4.4.1. Influencia de Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones

Níquel (II)

Se evaluó el tiempo y la velocidad en la retención de iones níquel (II) de cómo afectan en la optimización y otros parámetros, en función del porcentaje de retención de iones níquel (II) mediante la técnica de superficie de respuesta.

4.4.1.1. Análisis de Varianza para el Porcentaje de Retención.

La variabilidad en el porcentaje de retención de iones níquel (II) se presenta en el ANOVA que se encuentra en la tabla 21. Según lo que se muestra en esta tabla, se divide la variación del porcentaje de eliminación de iones níquel (II) en componentes separados para cada efecto, verificando estadísticamente la relevancia de cada efecto al comparar su cuadrado medio con el valor estimado del error experimental dado. Se observa que ningún efecto tiene un valor-P inferior a 0,05, lo que indica que son significativamente distintos de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

De igual manera, el coeficiente de determinación R-Cuadrado indica que el modelo, una vez ajustado, revela un 46,548 % de la variabilidad en el porcentaje de eliminación de iones níquel (II). En cuanto al R-cuadrado ajustado, que es el más apropiado para evaluar modelos con distintos números de variables independientes, se sitúa en 0,0 %. Además, el

error estándar de la estimación sugiere que la desviación estándar de los residuos es de 2,95.

El error absoluto medio (MAE) de 1,77 representa el promedio de los errores. El estadístico de Durbin-Watson (DW) evalúa los errores para comprobar si existe alguna correlación relevante según la secuencia en la que se presentan los datos. Dado que el valor-P supera el 5,0 %, no se encuentra evidencia de autocorrelación serial en los errores con un nivel de significancia del 5,0 %.

Tabla 21

Análisis de variabilidad para el porcentaje de retención de iones níquel (II)

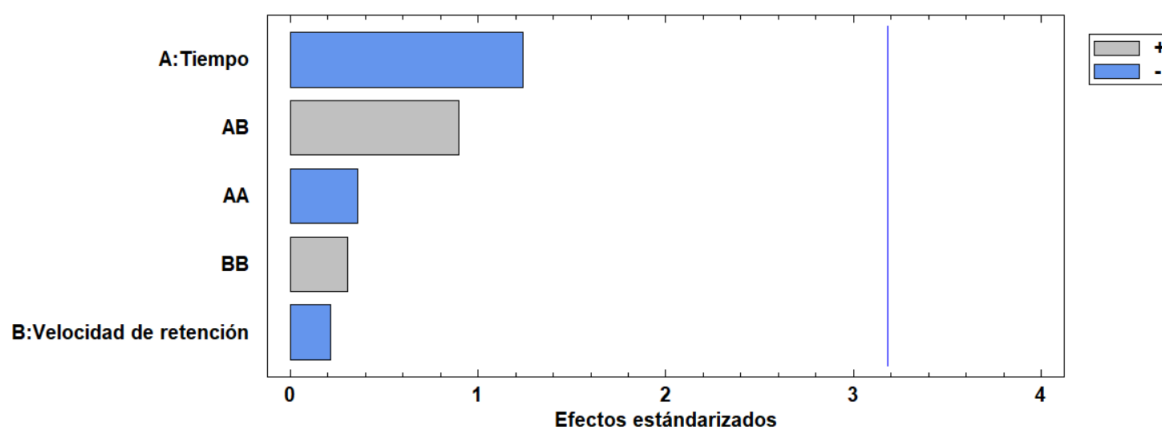
Fuente	Suma de cuadrados	G ₁ cuadrado	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
A: Tiempo de retención	13,4102	1	13,4102	1,54	0,3027
B: Velocidad de retención	0,395267	1	0,395267	0,05	0,8449
AA	1,13001	1	1,13001	0,13	0,7425
AB	6,99603	1	06,99603	0,80	0,4360
BB	0,802222	1	0,802222	0,09	0,7813
Error Total	26,1055	3	8,70183		
Total (corr.)	48,8392	8			

En la imagen de la figura 19 se muestra la carta estándar de Pareto respecto al índice de retención de níquel (II), la cual valida los hallazgos del ANOVA sobre la relevancia de las variables tiempo y velocidad de retención en la retención de iones níquel (II). En esta se observa que las dos variables no alcanzan la línea vertical de significancia a 3,20; por

consiguiente, ninguna de estas tiene un impacto significativo en el nivel de retención de iones níquel (II).

Figura 19

Carta estándar de Pareto para el porcentaje de retención de iones níquel (II)



En la tabla 22 se presentan los efectos aproximados de cada interacción analizada en relación al porcentaje de retención de iones níquel (II); se especifica el margen de error individual de cada uno de los efectos e interacciones de las variables independientes en el proceso de retención.

De acuerdo a la tabla 22, el componente tiempo de retención tiene efecto negativo de -2,99; para la variable velocidad de retención el valor de su interacción es de -0,5133; en cuanto a la interacción A tiempo vs tiempo de retención su valor es -1,503, presenta efecto negativo y para la interacción velocidad con velocidad su interacción es de 2,645 valor positivo. Considerando que el valor absoluto de 2,99 es mayor y le corresponde al tiempo de retención. Se afirma que, la variable tiempo de retención presenta mayor efecto en el porcentaje de retención de iones níquel (II).

Tabla 22

Efectos aproximados para el porcentaje de retención de iones níquel (II)

Efecto	Estimado	Error Estándar
Promedio	12,8611	2,1980
A: Tiempo de retención	-2,99	2,4090
B: Velocidad de retención	-0,5133	2,4090
AA	-1,503	4,1717
AB	2,645	2,9500
BB	1,267	4,1717

4.4.1.2. Coeficientes de Regresión para el Porcentaje de Retención de Iones

Níquel (II).

Los datos sobre los coeficientes de regresión para la variable dependiente del porcentaje de retención de iones de níquel (II) se presentan en la tabla 23.

Tabla 23

Coeficientes de regresión para el nivel de retención de iones níquel (II)

Coeficiente	Estimado
Constante	43,1861
A: Tiempo de retención	-0,17002
B: Velocidad de retención	-0,04617
AA	-0,00083
AB	0,00022
BB	0,000016

La información del diseño del experimento se adaptó al modelo de regresión que se muestra a continuación:

$$y = 43,1861 - 0,17002x_1 - 0,04617x_2 - 0,00083x_1^2 + 0,00022x_1x_2 + 0,000016 x_2^2.$$

Dónde:

y: porcentaje de retención de iones níquel (II).

x_1 : tiempo de retención.

x_2 : velocidad de retención.

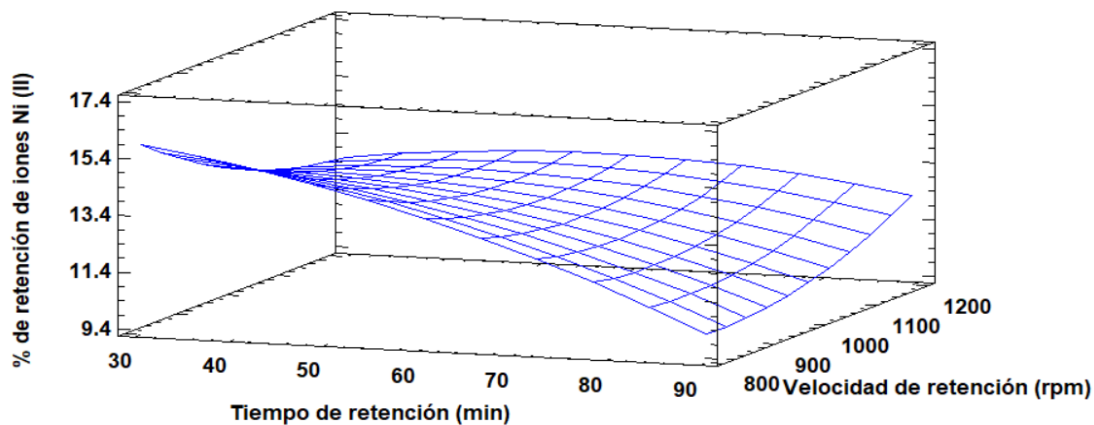
4.4.1.3. Superficie de Respuesta para el Porcentaje de Retención de iones

Níquel (II).

El diagrama de respuesta superficial relativa al porcentaje de retención de iones de níquel (II) se presenta en la figura 20, donde se observa cómo se distribuye el nivel de retención según el tiempo y la velocidad de retención.

Figura 20

Diagrama de superficie de respuesta para el porcentaje de retención de iones níquel (II)



4.4.1.4. Gráfica de Contornos para el Porcentaje de Retención de Iones

Níquel (II).

La tabla 24 expone los valores óptimos de tiempo y velocidad de retención para el porcentaje de retención de iones níquel (II).

Tabla 24

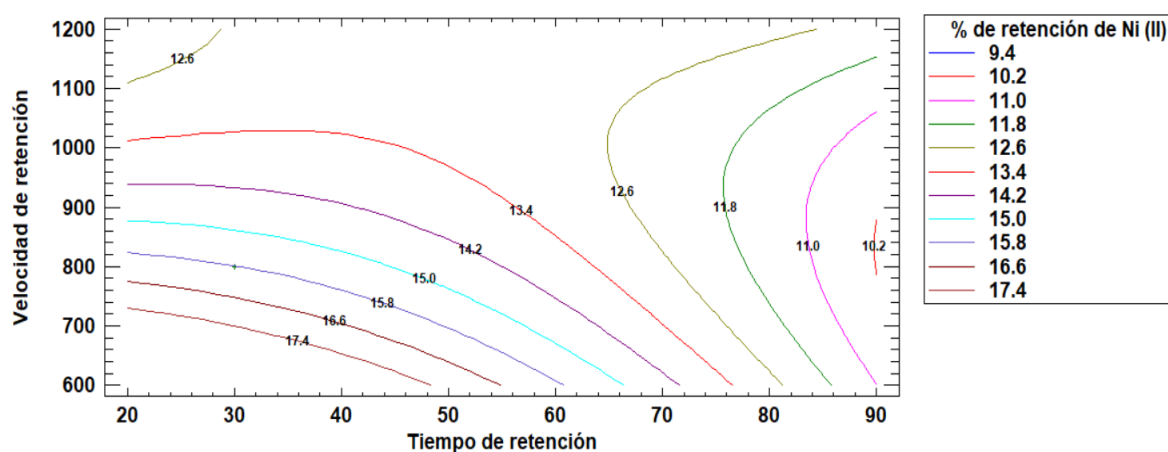
Resultado óptimo para el porcentaje de retención de iones níquel (II)

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo de retención (min)	30	90	30,0
Velocidad de retención (rpm)	800,0	1200,0	800,0

Del mismo modo, en la figura 21 se presenta la gráfica de contornos aproximado del valor optimizado del porcentaje de retención de iones níquel (II), en ella se visualización el punto máximo del porcentaje de retención de iones níquel (II).

Figura 21

Gráfica de contornos aproximado para el porcentaje de retención de iones níquel (II)



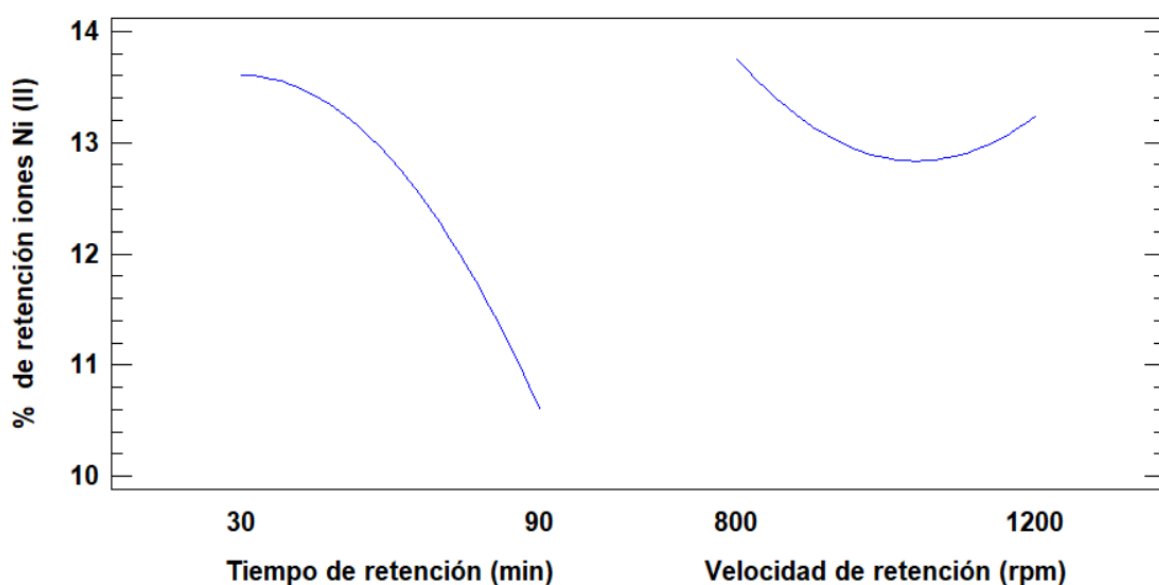
Las condiciones óptimas del proceso de retención fueron: de 30 minutos, 800 rpm de velocidad con 15,82 % de retención de iones níquel (II).

4.4.1.5. Influencia del Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones Níquel (II)

La grafica de influencia de las variables tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) se visualiza en la figura 22.

Figura 22

Influencia de tiempo y velocidad en el porcentaje de retención de iones níquel (II)



Según la figura 22, la variable tiempo no presenta influencia en el porcentaje de retención de iones níquel (II), por qué cuando se incrementa el tiempo, se observa que el porcentaje de retención disminuye, se podría indicar que la influencia se vería reflejada a tiempos menores de 30 minutos. Por otro lado la variable velocidad si, al inicio de experimento cuando se incrementa la velocidad hasta aproximadamente 1000 rpm

disminuye el porcentaje de retención hasta un mínimo, por encima de 1000 rpm de velocidad el porcentaje de retención se incrementa; en consecuencia, se podría afirmar que por encima de 1200 rpm de velocidad se obtendría resultados altos del porcentaje de retención de iones níquel (II).

4.5. Retención de Iones Plomo (II)

Con el mismo criterio considerado para evaluar la retención de níquel (II), también se utilizó la muestra BETCVM-B que presentó mayor área superficial (17,60 m²/g), se logró evaluar el porcentaje de retención de iones plomo (II).

En la tabla 25 se reportan los resultados de la evaluación de la retención de iones plomo (II) según el diseño factorial considerado, en la mencionada tabla se visualiza que el porcentaje más alto de retención de iones plomo (II) se da en la muestra **5 (RPb-5)** con **99,86 %** de retención, bajo condiciones de 90 minutos y de 800 rpm de velocidad. Ver anexo 10,3 y 10,4.

Tabla 25

Resultados de la retención de iones plomo (II) según el diseño factorial 3²

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	% retención de iones Pb (II)
1	RPb-1	60	1000	99,56
2	RPb-2	90	1200	98,37
3	RPb-3	30	1000	99,52
4	RPb-4	30	800	99,79
5	RPb-5	90	800	99,86
6	RPb-6	60	800	99,57
7	RPb-7	30	1200	99,76
8	RPb-8	60	1200	99,30
9	RPb-9	90	1000	99,12

Nota. RPb-x, indica retención de iones plomo (II) en la muestra x

El pH de la solución de iones plomo (II) fue de 4,75; y el pH promedio luego del proceso de la retención fue de 6,82.

4.5.1. Influencia de Tiempo y Velocidad en la Retención de Iones Plomo (II)

La influencia del tiempo y velocidad en la optimización y otras evaluaciones en el proceso de retención de iones plomo (II) se determinó por el método de superficie respuesta (MSR), tomando en consideración el porcentaje de retención de iones plomo (II) como variable respuesta.

4.5.1.1. Análisis de Varianza para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).

El nivel de retención de iones plomo (II) es analizado a través de un ANOVA, como se muestra en la tabla 26. Esta tabla indica que la variabilidad en el porcentaje de remoción de iones plomo (II) se descompone en diferentes componentes para cada uno de los efectos, y se evalúa la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio con el estimado del error experimental. Se observa que las dos variables, tiempo y velocidad de retención, tienen un impacto muy significativo en el porcentaje de retención de iones plomo (II), con un valor-P inferior a 0,05, lo que demuestra que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

De igual manera, el estadístico R-Cuadrado indica que el modelo corregido explica el 92,3532 % de la variabilidad en el porcentaje de retención de iones plomo (II). En cuanto al estadístico R-Cuadrado ajustado, que es el más apropiado para comparar modelos con distintos números de variables independientes, su valor es de 79,61 %. Además, el error estándar de la estimación revela que la desviación estándar de los residuos es de 0,2084.

El error absoluto medio (MAE) de 10,42 representa el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) evalúa los residuos para verificar si existe alguna correlación significativa según el orden de los datos. Dado que el valor-P es superior

al 5,0 %, no se encuentra evidencia de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

Tabla 26

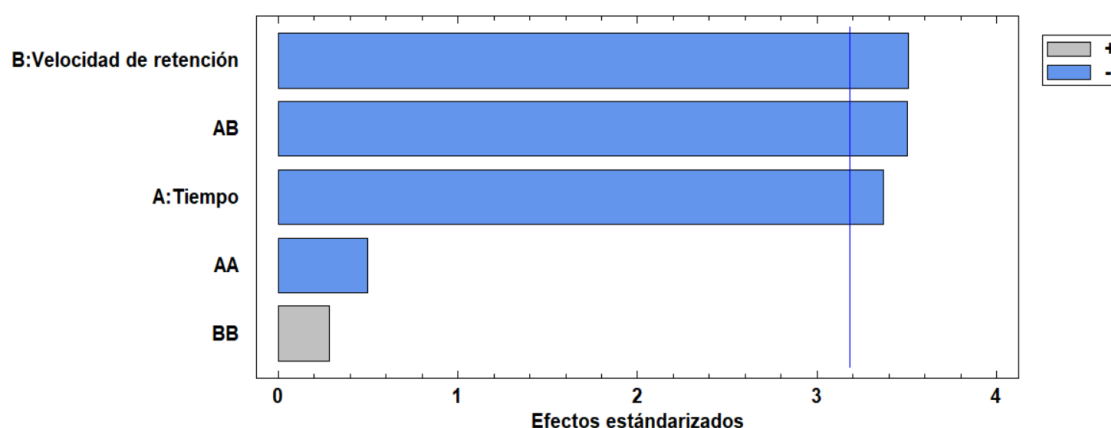
Análisis de la variabilidad para el porcentaje de retención de iones plomo (II)

Fuente	Suma de cuadrados	G ₁ cuadrado	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
A: Tiempo de retención	0,4931	1	0,4931	11,35	0,0435
B: Velocidad de retención	0,5340	1	0,5340	12,29	0,0393
AA	0,01076	1	0,01076	0,25	0,6530
AB	0,5329	1	0,5329	12,27	0,0394
BB	0,003472	1	0,003472	0,08	0,7958
Error Total	0,1303	3	0,04345		
Total (corr.)	1,7045	8			

La figura 23 muestra la carta estándar de Pareto relativa al porcentaje de retención de iones plomo (II), lo cual valida los resultados del ANOVA respecto al nivel de significancia de las variables tiempo y velocidad de retención en la captura de iones plomo (II). En esta carta, se observa que ambas variables superan la línea vertical de significancia establecida en 3,20, al igual que la interacción entre tiempo y velocidad. Por lo tanto, se concluye que ambas variables influyen de manera significativa en el porcentaje de retención de iones plomo (II).

Figura 23

Carta estándar de Pareto para el porcentaje de retención de iones plomo (II)



Además, la tabla 27 presenta los efectos aproximados de cada una de las interacciones analizadas en relación con el porcentaje de retención de iones plomo (II). En ella, se puede apreciar el error individual asociado a cada uno de los impactos e interacciones de las variables independientes en el proceso de retención de iones plomo (II).

Tabla 27

Efectos aproximados para el porcentaje de retención de iones plomo (II)

Efecto	Estimado	Error Estándar
Promedio	99,449	0,1554
A: Tiempo de retención	-0,5733	0,1702
B: Velocidad de retención	-0,5967	0,1702
AA	-0,1467	0,2948
AB	-0,73	0,2084
BB	0,0833	0,2948

Según la tabla 27, la variable tiempo de retención presenta efecto negativo con -0,5733 para el % de retención de iones plomo (II); para la variable velocidad de retención el valor de su interacción es de -0,5967 el cual es nada significativo para el porcentaje de retención de iones plomo (II); en cuanto a la interacción tiempo vs tiempo de retención su valor es -0,1467 presenta efecto negativo; para la interacción tiempo-velocidad su valor de interacción es negativo con -0,73 y para la interacción velocidad-velocidad su interacción es positivo con 0,0833 valor positivo, siendo el efecto importante de velocidad de retención quien tiene el valor absoluto más alto, de 0,5967, ante el porcentaje de retención de iones plomo (II).

4.5.1.2. Coeficientes de Regresión para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II)

La tabla 28 proporciona datos sobre los coeficientes de regresión correspondientes al porcentaje de retención de iones plomo (II).

Tabla 28

Coeficientes de regresión para el nivel de retención de iones plomo (II)

Coeficiente	Estimado
Constante	98,6122
A: Tiempo de retención	0,06106
B: Velocidad de retención	0,000075
AA	-0,000081
AB	-0,00006083
BB	0,000001042

Los resultados del diseño experimental se adecuaron al modelo de regresión siguiente:

$$y = 98,6122 + 0,06106x_1 - 0,000081x_2 - 0,000081x_1^2 - 0,00006083x_1x_2 + 0,000001042 x_2^2.$$

Dónde:

y: es el porcentaje de retención de iones plomo (II).

x_1 : viene a ser el tiempo de retención.

x_2 : es la velocidad de retención.

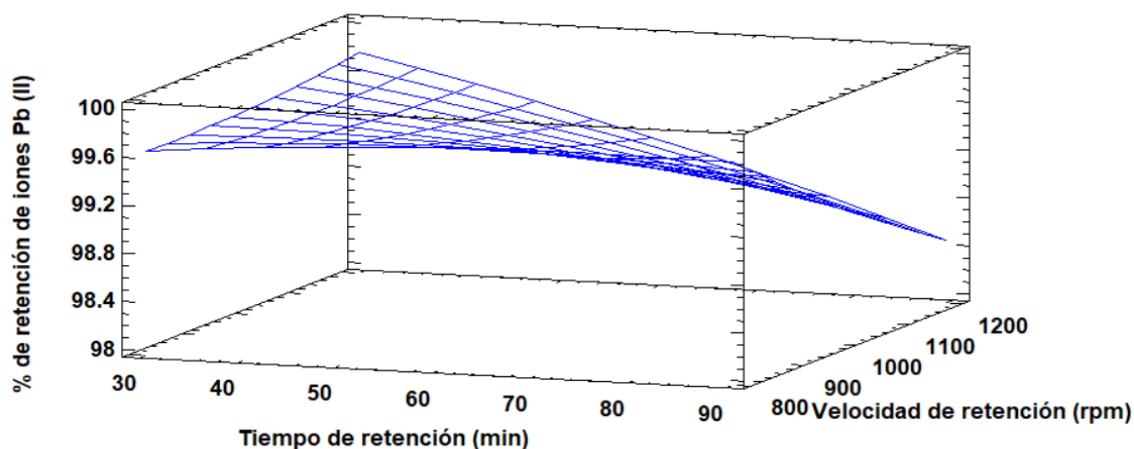
4.5.1.3. Superficie de Respuesta para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).

El diagrama de superficie respuesta para el porcentaje de retención de iones plomo (II), se visualiza en la figura 24, en ella se percibe la distribución del porcentaje de retención de iones plomo (II) en función de tiempo y velocidad de retención.

La figura 24 muestra el esquema de superficie respuesta correspondiente al porcentaje de retención de iones plomo (II), en ella se percibe la distribución del porcentaje de retención de iones plomo (II) en función del tiempo y velocidad.

Figura 24

Diagrama de superficie de respuesta para el porcentaje de retención de iones plomo (II)



4.5.1.4. Gráfica de Contornos para el Porcentaje de Retención de Iones Plomo

(II).

Secuentemente, en la tabla 29 se reportan los valores óptimos de tiempo y velocidad de retención respecto al porcentaje de retención de iones plomo (II).

Tabla 29

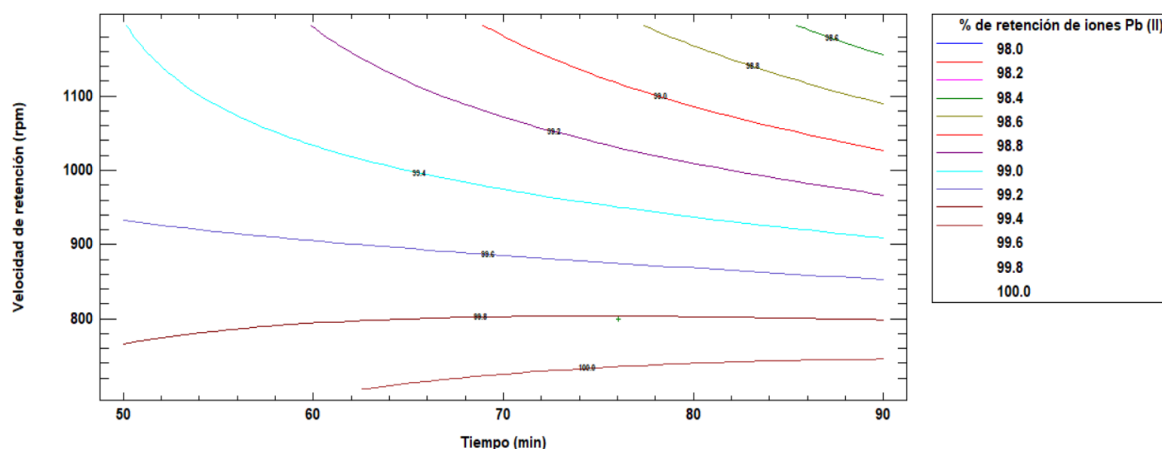
Resultado optimizado para el porcentaje de retención de iones plomo (II)

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Tiempo de retención (min)	30	90	76,03
Velocidad de retención (rpm)	800,0	1200,0	800,0

Así mismo, en la figura 25 se presenta la gráfica de contornos aproximado del valor optimizado del porcentaje de retención de iones plomo (II), donde se visualización el punto máximo del porcentaje de retención de iones plomo (II).

Figura 25

Gráfica de contornos aproximado para el porcentaje de retención de iones plomo (II)



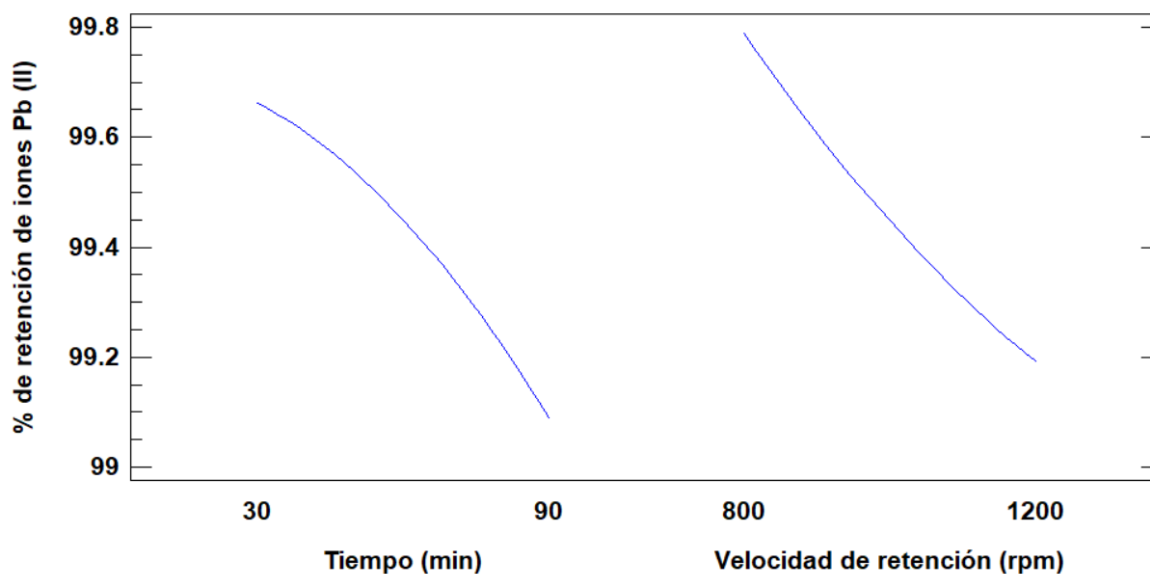
Las condiciones óptimas del proceso de retención fueron de 76,03 minutos, 800 rpm de velocidad con 99,81 % de retención de iones plomo (II).

4.5.1.5. Influencia del Tiempo y Velocidad en el Porcentaje de Retención de Iones Plomo (II).

La grafica de influencia de las variables tiempo y velocidad en la retención de iones plomo (II), se reporta en la figura 26.

Figura 26

Influencia de tiempo y velocidad en el porcentaje de retención de iones plomo (II)



Según la figura 26, se observa que ambas variables tiempo y velocidad no presenta influencia en el porcentaje de retención de iones plomo (II); en ambos casos se observa que cuando ambas variables se incrementan, disminuye el porcentaje de retención de iones plomo (II); sin embargo, según los resultados estadísticos obtenidos, la influencia de las

variables tiempo y velocidad se podría visualizar a tiempos inferiores a 30 minutos y a velocidades menores de 800 rpm.

V. Discusión de Resultados

Respecto Al objetivo específico 1: “Determinar los componente mineralógicos y área superficial de las cenizas volantes”, por la técnica de difracción de rayos X se pudo determinar la composición mineralógica de la ceniza volante de inicio, en la tabla 14 se verifica tres componentes mineralógicos; siendo el primero con 92,23 % de cuarzo (SiO_2), con 5,83 % de fengita ($\text{K}_{0,95}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,20}\text{Fe}_{0,28}\text{Al}_{2,27}\text{Si}_{3,25}\text{O}_{10}(\text{OH})_{1,96}\text{F}_{0,04}$) y con 1,94 % de hematita (Fe_2O_3); así mismo, en el difractograma de la figura 5 de la ceniza volante inicial, se visualiza dos picos muy típicos que la identifican en 2θ igual a 21° y $26,5^\circ$ perteneciente al cuarzo (SiO_2), adicionalmente el mineral Fengita como fase cristaliza el cuál se identifica en 2θ igual a $8,8^\circ$ y en $19,6^\circ$; y hematita en 2θ a 33° .

En cuanto a la caracterización mineralógica por difracción de rayos X de las cenizas volantes; autores como Pérez et al. (2025) por difracción de rayos X de las cenizas volantes utilizadas encontraron en su composición dos minerales, cuarzo y moscovita; Parra-Huertas et al. (2023), encontraron en sus cenizas volantes cuarzo, mullita, cal y sillimanita; Kobayashi et al. (2020) en su ceniza volante encontraron dos componentes: cuarzo y mullita; Hums E. (2017) en la composición de la ceniza volantes trabajadas, encontró amorfos y fase cristalina restante consiste en: cuarzo, mullita, hematita y cal; Zhang et al. (2018) encontraron en sus cenizas volantes dos componentes: cuarzo y mullita; Visa M. (2016) en la composición de la ceniza volante encontraron cuarzo, oxido de aluminio, ramsdellita y hematita. De acuerdo a lo señalado, se indica que la técnica por difracción de rayos nos permite determinar la composición mineralógica de las cenizas volantes y de material cualquier material sólido; así mismo, se confirma que el cuarzo es componente mineralógico que se encuentra generalmente en las cenizas volantes. Así pues, se sostiene

que su alta concentración de SiO_2 le facilita su uso como material inicial para la producción de materiales adsorbentes a través de procesos de síntesis.

Se obtuvo $11,41 \text{ m}^2/\text{g}$ de área superficial para ceniza volante inicial, valor determinado por el método BET, investigadores como Pérez et al. (2025) para la ceniza volante por el método BET encontraron un valor de $8,59 \text{ m}^2/\text{g}$; Parra-Huertas et al. (2023) reportaron $6 \text{ m}^2/\text{g}$ de área superficial; Langauer et al. (2021) identificaron dos clases de cenizas volantes obtenidas de dos tipos de carbones, con áreas superficiales de $0,8$ y $3,6 \text{ m}^2/\text{g}$; y Gjyli et al. (2021), utilizando cenizas volantes en su estudio, hallaron un área superficial de $1,5 \text{ m}^2/\text{g}$. De acuerdo con lo informado y cotejado con la bibliografía, el área superficial de la ceniza volante empleada en este estudio se sitúa dentro del espectro de los valores hallados en varios estudios que han utilizado cenizas volantes.

Por otro lado, en las tablas 12 y 13 se muestran los resultados de la evaluación de la capacidad de adsorción de la ceniza volante en su estado inicial. Se observa en promedio de $5,15 \%$ de retención de iones Ni (II) y un $17,27 \%$ en promedio de retención de iones Pb (II) , lo que señala que las cenizas volantes en su estado inicial poseen características adsorbentes.

Considerando al objetivo específico 2: “Determinar las condiciones adecuadas de concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio para modificar el área superficial de las cenizas volantes”, según el diseño factorial del tipo 2^2 y resultados reportados en la tabla 15, se observa que la muestra B (BETCVM-B) evidencia el valor elevado del área superficial de $17,60 \text{ m}^2/\text{g}$, determinando así las condiciones adecuadas en la modificación del área superficial; con $2,0 \text{ M}$ de concentración de NaOH y $1,0 \text{ g}$ de óxido de silicio. Adicionalmente, las condiciones óptimas de modificación de las cenizas fueron determinadas por la Metodología de Superficie Respuesta de Superficie; coincidentemente

es igual a las condiciones adecuadas, siendo de 2,0 M para la concentración de NaOH, 1,0 g de óxido de silicio y con 17,60 m²/g de área superficial.

Respecto a la composición mineralógica de las cenizas volantes modificadas, de acuerdo a la tabla 14 se reportan los resultados de los componentes mineralógicos de las muestras de cenizas volantes modificadas. En ella se evidencia que, las muestras de cenizas volantes modificadas DRX-i, DRX-A y DRX-D se caracterizan por presentar en su composición mineralógica 03 minerales; las muestras DRX-B y RDX-C, presentan 04 minerales; así mismo, se confirma que en todas las cenizas volantes modificadas se ha formado sodalita, el cual viene a ser un tipo de zeolita.

La muestra modificada BETCVM-B según los resultados presentó la mayor área superficial, siendo de 17,60 m²/g, el cual se incrementó en un 35,2 % comparado con la ceniza volante de inicio. De acuerdo a la obtención de materiales adsorbentes y síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes, investigadores como: Pérez et al. (2025) prepararon un material adsorbente con 33,99 m²/g de área superficial; Parra-Huertas et al. (2023), sintetizaron zeolita Faujasita sódica con área superficial de 460 m²/g; Cheng et al. (2018), a partir de cenizas volantes prepararon un material adsorbente con área superficial de 270 m²/g; Panek et al. (2021) obtuvieron zeolita (Na-X) pura a partir de cenizas con área superficial desarrollada de 728 m²/g; Ren y colaboradores (2018), prepararon zeolita del tipo A, con un área superficial de 43,7 m²/g; Wulandari y otros (2019) obtuvieron zeolita del tipo A, con área superficial de 37,12 m²/g; y Makgabutlane et al. (2020) obtuvieron sodalita con un área superficial de 16 m²/g. Según lo descrito, las cenizas volantes es un material de inicio en la síntesis y obtención de materiales adsorbentes; donde es necesario señalar que la modificación química trae como resultado diferentes valores del área superficial, dependiendo del método de síntesis o de su preparación.

Referido al objetivo específico 3: “Determinar el nivel de influencia de la concentración de hidróxido de sodio y masa de óxido de silicio en la modificación del área superficial de las cenizas volantes”, en esta etapa se analizó por la metodología de superficie respuesta la influencia de la concentración hidróxido de sodio (NaOH y de la masa de óxido de silicio en la modificación del área superficial.

La influencia correspondiente a las dos variables independiente se presenta en la figura 18; ahí se observa que la variable concentración molar de NaOH no presenta influencia positiva para el aumento del área superficial de las cenizas volantes modificadas, su tendencia es disminuir cuando se incrementa la concentración de NaOH; se podría indicar que la influencia se vería afectado a concentraciones inferiores a 2,0 M de NaOH. Respecto a la influencia de la masa de óxido de silicio; en la figura 18 se visualiza claramente la tendencia del incremento lineal del área superficial; evidenciando que, conforme se incrementa la masa de óxido de silicio el valor del área superficial aumenta. Por lo señalado, se afirma que la variable masa de óxido de silicio tiene influencia de carácter positivo en el aumento del área superficial.

Concerniente al objetivo específico 4: “Determinar las condiciones de tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando cenizas volantes modificadas”, para los resultados en la retención de níquel (II) según la tabla 20, en ella se evidencia que la muestra 6 (**RNi-6**) presenta una retención de iones níquel (II) de 16,50 % bajo condiciones adecuadas de 30 minutos y de velocidad 1000 rpm. Así mismo, por metodología respuesta se encontró las condiciones óptimas de retención de iones níquel (II), siendo 30 minutos, 800 rpm de velocidad y con 15,82 % de retención de iones níquel (II). Respecto a la retención de iones níquel (II); autores como Zhang et al. (2018) sintetizaron zeolita del tipo X y evaluaron su capacidad de remoción con iones Ni^{2+} en agua, siendo está por encima del 90 %; Liu et al. (2017) utilizando β -zeolita mostro alto porcentaje

de adsorción de Ni^{2+} en aguas y que dependía significativamente de los valores de pH y He y colaboradores (2020), emplearon cenizas de carbón mineral para la síntesis de una nueva zeolita tipo A, la cual resultó ser sumamente eficaz como adsorbente, logrando eliminar hasta el 94% de iones Ni^{2+} en aguas residuales. Según la literatura y resultados experimentales encontrados en la investigación, se puede afirmar que la ceniza volante modificado no es tan selectivo para eliminar iones níquel (II).

Por otra parte, en la tabla 25, se visualiza que la muestra 5 (RPb-5) tiene 99,86 % de retención de iones plomo (II) con condiciones adecuadas de 90 minutos y 800 rpm de velocidad. Del mismo modo, por metodología de superficie respuesta se encontró las condiciones óptimas de retención de iones plomo (II), con 76,03 minutos, 800 rpm de velocidad y con 99,81 % de la retención de iones plomo (II). Respecto a la retención de iones plomo (II); investigadores como Panek et al. (2021), removieron Pb^{2+} hasta 575 mg/g usando zeolita sintética del tipo Na-X usando como materia prima las cenizas volantes; Yang et al. (2022) lograron sintetizar zeolita heulandita utilizando cenizas volantes, en la evaluación de adsorción de Pb (II) alcanzó 446,73 mg/g mediante intercambio; Zhu y colaboradores (2018), obtuvieron zeolita A-Na usando cenizas volantes, el cual lo utilizaron para eliminar iones de plomo (II), de aguas residuales sintéticas con una eficiencia de eliminación del 99,9%; y Kobayashi et al. (2020) sintetizaron zeolitas del tipo K, encontraron que es selectivo para la adsorción de Pb^{2+} en sistemas de soluciones binarias que contienen cationes. En base a los resultados obtenidos en la retención de 99,86 % de iones Pb (II), podemos señalar que la ceniza volante modifica con área superficial de 17,60 m^2/g es selectivo para la retención de iones plomo (II).

Según lo mencionado, podemos afirmar que las cenizas volantes son materiales desechables, que pueden emplearse como material residual para la producción de materiales adsorbentes y zeolitas, y para su aplicación en la reducción de metales pesados en efluentes de sistemas líquidos. Esta aplicación logra uno de los propósitos de la

economía circular, otorgándole un valor añadido a un material considerado como uno de los contaminantes sólidos.

Respecto al objetivo específico 5: “Determinar el nivel de influencia del tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) usando cenizas volantes modificadas”, según los hallazgos experimentales en el presente estudio, mediante el uso de ceniza volante modificada se consiguió la retención del 16,50% de iones níquel (II); mediante el método de superficie de respuesta, se lograron resultados de la influencia de las variables tiempo y velocidad en la retención de iones níquel (II). La figura 22 muestra el nivel de influencia del tiempo y la velocidad en el porcentaje de retención de iones níquel (II), donde la variable tiempo no tiene influencia en el porcentaje de retención de iones níquel (II), se podría indicar que la influencia se vería reflejada a tiempos menores de 30 minutos; sin embargo, la variable velocidad si, al inicio del experimento al incrementar la velocidad se da la disminución del porcentaje de retención hasta un mínimo, por encima de 1000 rpm de velocidad, el porcentaje de retención se incrementa. En consecuencia, se podría afirmar que por encima de 1200 rpm de velocidad se obtendría resultados mejores del porcentaje de retención de iones níquel (II).

En cuanto a la retención de iones plomo (II), se logró una retención del 99,86 %, según la figura 26 se evidencia que ambas variables tiempo y velocidad no presenta influencia en el porcentaje de retención de iones plomo (II); sin embargo, según los resultados estadísticos obtenidos, la influencia de las variables tiempo y velocidad se podría visualizar a tiempos inferiores a 30 minutos y a velocidades menores de 800 rpm.

VI. Conclusiones

- Se determino los componentes mineralógicos de las cenizas volantes mediante difracción de rayos X, se encontró tres tipos de minerales: con 92,23% en masa de cuarzo (SiO_2), con 5,83 % de fengita y con 1,94 % de hematita (Fe_2O_3); de igual forma, mediante el método BET se determinó 11,41 m^2/g de área superficial para la ceniza volante en su condición inicial
- Se determinó las condiciones adecuadas para modificar las cenizas volantes en base al aumento del área superficial, estableciéndose 2,0 M para la concentración de NaOH; 1,0 g en masa de óxido de silicio y 17,60 m^2/g de área superficial. Además, mediante la metodología de respuesta de superficie (MSR), se establecieron las condiciones óptimas para la modificación, siendo los mismos valores encontradas en las condiciones adecuadas.
- Utilizando el método estadístico de metodología de superficie respuesta (MSR) se logró analizar el grado de influencia de la concentración de NaOH y masa de óxido de silicio en proceso de modificación del área superficial de las cenizas volantes; se encontró que la variable concentración de NaOH no presenta influencia positiva para el aumento del área superficial de las cenizas modificadas debido a que disminuye el área superficial al incrementar la concentración de NaOH. En cuanto a la influencia de la variable masa de óxido de silicio; se encontró que, si presenta influencia positiva, al aumentar la masa de óxido de silicio se incrementa el área superficial, siendo directamente proporcional.
- Se determino los parámetros adecuados en la retención de iones níquel (II) y plomo (II) siendo: para el ion níquel (II) de 30 minutos, 1000 rpm de velocidad y de 16,50 % de retención; y por metodología de superficie respuesta (MSR) se determinó las condiciones óptimas de retención, siendo de: 30 minutos, 800 rpm de velocidad de agitación y 15,82 % de retención de iones níquel (II). Con respecto a la retención de

plomo (II), se encontró las condiciones favorables de 90 minutos, 800 rpm de velocidad y de 99,86 % de retención; así mismo, por metodología de Superficie Respuesta se determinó las condiciones óptimas de retención, siendo de: 76,03 minutos, 800 rpm de velocidad de agitación y 99,81 % de retención de iones plomo (II).

- Por el método de superficie respuesta (MSR) se logró determinar que la variable tiempo no presenta influencia positiva en el porcentaje de retención de iones níquel (II), la influencia podría darse a tiempo menores de 30 minutos. Con respecto a la variable velocidad se encontró que si presenta influencia positiva en el porcentaje de retención de iones níquel (II) a valores superiores de 1200 rpm de velocidad. Asimismo, para el porcentaje de retención de iones plomo (II), se determinó que, ambas variables tiempo y velocidad no presenta influencia en el porcentaje de retención de iones plomo (II), debido a que ambas variables presentan influencia en forma inversamente proporcional con el porcentaje de retención de iones plomo (II); sin embargo, la influencia de las variables tiempo y velocidad se podría visualizar a tiempos inferiores a 30 minutos y a velocidades menores de 800 rpm.

VII. Recomendaciones

- Evaluar diferentes condiciones, para la obtención de materiales adsorbentes especialmente zeolitas, a partir de cenizas volantes, considerando temperaturas superiores a 150 °C y utilizando un reactor de alta presión.
- Realizar estudios cinéticos para entender la velocidad de adsorción y determinar el modelo más adecuado para describir el proceso.
- Caracterizar las cenizas volantes y las modificadas, con técnicas de última generación especialmente como: fluorescencia de rayos X (DRXF), la microscopía electrónica de barrido (SEM), entre otras.

VIII. Referencias Bibliográficas

- Aparicio Ceja, M. E., Carbajal Arizaga, G. G., Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
- Boycheva, S. V., & Zgureva, D. M. (s. f.). *SURFACE STUDIES OF FLY ASH ZEOLITES VIA ADSORPTION/DESORPTION ISOTHERMS*.
- Boycheva, S., Zgureva, D., Lazarova, K., Babeva, T., Popov, C., Lazarova, H., & Popova, M. (2020). Progress in the Utilization of Coal Fly Ash by Conversion to Zeolites with Green Energy Applications. *Materials*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ma13092014>
- Buzukashvili, S., Sommerville, R., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2024). An overview of zeolites synthesised from coal fly ash and their potential for extracting heavy metals from industrial wastewater. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 63(1), 130-152. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2160576>
- Castaño, E., & Domínguez, J. (2010). *Diseño de experimentos: Estrategias y análisis en ciencias e ingeniería* (Primera edición). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Chen, X., Song, H., Gui, Y., Wang, L., & Cheng, F. (2018). Converting waste coal fly ash into effective adsorbent for the removal of ammonia nitrogen in water | Request PDF. *ResearchGate*, 53(18). <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2394-1>
- Gjyli, S., Korpa, A., Teneqja, V., Siliqi, D., & Belviso, C. (2021). Siliceous Fly Ash Utilization Conditions for Zeolite Synthesis. *Environmental Sciences Proceedings*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/iecms2021-09359>
- Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (tercera edición). Mc Graw Hill. Interamericana editores.

- He, X., Yao, B., Xia, Y., Huang, H., Gan, Y., & Zhang, W. (2020). Coal fly ash derived zeolite for highly efficient removal of Ni²⁺ in waste water. *Powder Technology*, 367, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>
- Hums, E. (2017). Synthesis of Phase-Pure Zeolite Sodalite from Clear Solution Extracted from Coal Fly Ash. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*, 08(02). <https://doi.org/10.4172/2157-7544.1000187>
- Jain, P., Shrivastava, P., Malviya, V., Jain, S., & Dwivedi, M. K. (2021). Adsorptive removal of Pb(II) from aqueous solution using NaP zeolite synthesized from coal fly ash. *AIP Conference Proceedings*, 2369(1), 020200. <https://doi.org/10.1063/5.0061220>
- Kobayashi, Y., Ogata, F., Saenjum, C., Nakamura, T., & Kawasaki, N. (2020). Removal of Pb²⁺ from Aqueous Solutions Using K-Type Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash. *Water*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w12092375>
- Längauer, D., Čablík, V., Hredzák, S., Zubrik, A., Matik, M., & Danková, Z. (2021). Preparation of Synthetic Zeolites from Coal Fly Ash by Hydrothermal Synthesis. *Materials*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/ma14051267>
- Liu, P., Yuan, N., Xiong, W., Wu, H., Pan, D., & Wu, W. (2017). Removal of Nickel(II) from Aqueous Solutions Using Synthesized β -Zeolite and Its Ethylenediamine Derivative. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(11), 3067-3076. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04784>
- Liu, Y., Wang, G., Wang, L., Li, X., Luo, Q., & Na, P. (2019). Zeolite P synthesis based on fly ash and its removal of Cu(II) and Ni(II) ions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(2), 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.03.032>
- Makgabutlane, B., N. Nthunya, L., Musyoka, N., S. Dladla, B., N. Nxumalo, E., & D. Mhlanga, S. (2020). Microwave-assisted synthesis of coal fly ash-based zeolites for removal of ammonium from urine. *RSC Advances*, 10(4), 2416-2427. <https://doi.org/10.1039/C9RA10114D>

- Medina, Ó. L. O., Valencia, R. N. A., Castañeda, L. M. T., & Camargo, N. G. (2018). Evaluación de cenizas volantes como material adsorbente para la remoción de Pb²⁺ en solución acuosa. *Revista Mutis*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.21789/22561498.1410>
- Norma Técnica Española, UNE-EN-450. (2008). *Norma Técnica Española UNE-EN-450-1:2006+A1:2008*.
- Ogata, F., Nagai, N., Uematsu, Y., Kobayashi, Y., Kitamura, N., Saenjum, C., & Kawasaki, N. (2024). Synthesis of fine Na-type zeolite grains from coal fly ash and the assessment of the adsorption capability of lead ions from aqueous solutions. *RSC Sustainability*, 2(2), 491-498. <https://doi.org/10.1039/D3SU00421J>
- Panek, R., Medykowska, M., Wiśniewska, M., Szewczuk-Karpisz, K., Jędruchniewicz, K., & Franus, M. (2021). Simultaneous Removal of Pb²⁺ and Zn²⁺ Heavy Metals Using Fly Ash Na-X Zeolite and Its Carbon Na-X(C) Composite. *Materials*, 14(11), 2832. <https://doi.org/10.3390/ma14112832>
- Parra Soto, J. (2013). Aplicabilidad de la ecuación de BET a sólidos de textura diversa. *Materiales en adsorción y catálisis*, N° 6 octubre 2013, 14.
- Parra-Huertas, R. A., Calderón-Carvajal, C. O., Gómez-Cuaspud, J. A., & Vera-López, E. (2023). Synthesis and characterization of Faujasite-Na from fly ash by the fusion-hydrothermal method. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62(6), 527-542. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2023.01.004>
- Pérez-Chauca, L. F., Castañeda-Pérez, L. G., Carrasco-Venegas, L. A., Quispe-Cisneros, J. L., Torres-Garay, A., & González-Fernández, J. V. (2025). Modification of the Adsorption Capacity of Brick Industry Fly Ash for the Removal of Cd(II). *Solids*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/solids6020018>

- Ren, X., Xiao, L., Qu, R., Liu, S., Ye, D., Song, H., Wu, W., Zheng, C., Wu, X., & Gao, X. (2018). Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash. *RSC Advances*, 8(73), 42200-42209. <https://doi.org/10.1039/C8RA09215J>
- Rodríguez, F. (2010). Problemas más habituales en el uso de la adsorción física como técnica de caracterización de sólidos porosos. *Materiales en adsorción y catálisis*, N° 0 setiembre 2010, 13.
- Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Rojas, I. J. S. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13, 73-90. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Skoog, D., Holler, J., & Crouch, S. (2008). *Principios de análisis instrumental* (Sexta edición). Cengage Learning.
- Velandia C., F., & Hurtado M., M. (2017). Difracción de rayos X: Un mundo de aplicaciones por descubrir. *Ingeciencia*, 2(2), Article 2.
- Visa, M. (2016). Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment. *Powder Technology*, 294, 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.019>
- Wulandari, W., Paramitha, T., Rizkiana, J., & Sasongko, D. (2019). Characterization of Zeolite A from Coal Fly Ash Via Fusion-Hydrothermal Synthesis Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 543(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/543/1/012034>
- Yang, S., Yang, L., Gao, M., Bai, H., & Nagasaka, T. (2022). Synthesis of zeolite-geopolymer composites with high zeolite content for Pb(II) removal by a simple two-step method using fly ash and metakaolin. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134528>

Zhang, Y., Dong, J., Guo, F., Shao, Z., & Wu, J. (2018). Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash Produced by a Gasification Process for Ni²⁺ Removal from Water. *Minerals*, 8(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/min8030116>

Zhu, L., Ji, J., Wang, S., Xu, C., Yang, K., & Xu, M. (2018). Removal of Pb(II) from wastewater using Al₂O₃-NaA zeolite composite hollow fiber membranes synthesized from solid waste coal fly ash. *Chemosphere*, 206, 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.001>

IX. Glosario

- TGA-DTA: Análisis térmico diferencial y calorimetría diferencial de barrido.
- AREA SUPERFICIAL: Es una medida de la superficie expuesta a una muestra sólida a la escala microscópica, sus unidades son m^2/g .
- BET: Técnica física para determinar el área superficial de sólidos desarrollados por Brunauer–Emmett–Teller.
- CENIZAS VOLANTES: Es un tipo de polvo fino compuesto principalmente de SiO_2 y Al_2O_3 , que se origina por la combustión del carbón pulverizado.
- DRX: Difracción de rayos X.
- XRF: Espectrometría de fluorescencia de rayos X.
- FTIR: Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.
- SEM: Microscopía electrónica de barrido.
- RETENCIÓN: Cantidad que se retiene de algo.
- CV: cenizas volantes

I. INTRODUCCIÓN

A solicitud del Ing. León Pérez Chauca se realizó 05 estudios de difracción de rayos X, según solicitud N° 016-2024-INGEMMET/DL-ATTIG, con referencia en la carta N° 023-2024-FIQM/UNSCH-D, obteniéndose 05 difractogramas, identificando las fases cristalinas (minerales) de acuerdo al servicio requerido.

1. Objetivo

Identificar y cuantificar los minerales presentes en las muestras de solicitud N° 016-2024-INGEMMET/DL-ATTIG, por medio de la técnica de Difracción de Rayos X.

2. Ensayos

2.1 Difracción de Rayos X

La técnica de Difracción de Rayos X por el método de polvo es utilizada para la identificación y cuantificación de fases cristalinas (minerales). Los compuestos sin estructuras definidas (amorfos) no pueden ser estudiados ni cuantificados por esta técnica.

Una forma de expresar la difracción de rayos X en materiales cristalinos es mediante la Ley de Bragg, condición para que una familia de planos paralelos, regularmente separados en un cristal, refleje un haz de rayos X incidente (Fig. 1). Cada material cristalino tiene una estructura atómica característica, por lo tanto, difractarán los rayos X en un patrón característico único, conocido como difractograma o patrón de difracción.

Esta ley es expresada por la relación:

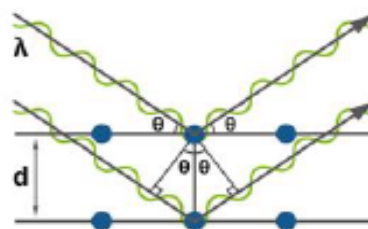


Figura N°1: Reflexión de Bragg mediante planos reticulares d_{hkl} .

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Donde

λ es la longitud de onda de la radiación incidente, 1.5406 Å ya que contamos con tubo de rayos X de Cu

d_{hkl} es el valor de los espaciados reticulares de las fases cristalinas presentes.

$\sin \theta$ es el seno del ángulo de difracción.

Luego de la irradiación de la muestra en polvo con rayos X, en un rango angular de barrido determinado, se obtiene un gráfico llamado difractograma, en donde el eje X son los ángulos de incidencia de la radiación a la muestra (expresado en grados) y el eje Y es la intensidad de la radiación difractada (expresada en cuentas). En el difractograma se presentan picos de intensidad los cuales son producto de una interferencia constructiva producida por los planos reticulares de las fases cristalinas, donde se cumple la ley de Bragg.

Esta técnica como se mencionó anteriormente solo permite identificar y cuantificar estructuras cristalinas (ordenadas), es decir se podrá indicar la presencia de material no estructurado (amorfo). La cuantificación de los minerales presentes en cada muestra es calculada con respecto a la fracción cristalina de la muestra, sin considerar el componente amorfo presente.

3. Condiciones de medición

Se realizó en un difractómetro marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, de ánodo de cobre, según las siguientes condiciones:

Tabla N° 01. Condiciones de medición

Tubo de Rayos X	
Tipo de ánodo	Cu
Energía	40 kV, 30mA
Condiciones de Medida	
Rango de Barrido	3° - 70°
Paso	0.02°
Tiempo por paso	2.0 s

II. PROCEDIMIENTO

1.- Irradiación.

Se colocó las muestras pulverizadas a malla -400, en su respectivo portamuestras, para luego introducirlo en el equipo e irradiarlas según las condiciones de medidas mencionadas, por un periodo aproximado de 33 min.

2.- Identificación y Cuantificación.

Para la identificación de fases cristalinas se utilizó la base de datos PDF5+ versión 2024, y se aplicó el método RIR (Reference Intensity Ratio) para la cuantificación utilizando el software Sleve+ de la ICDD (International Center of Diffraction Data).

3.- Exactitud y límite de detección.

La exactitud y el límite de detección en el análisis cuantitativo son dependientes del método usado, la calidad de los datos experimentales, y otros factores. Usualmente es aceptado un bajo límite de detección como el doble de la desviación estándar del valor promedio de background dividido por la diferencia de las cuentas del pico más intenso del perfil de difracción entre el background, esto se expresa:

$$LD = \frac{2x\sqrt{B}}{(I_M - B)} \%$$

donde

LD : límite de detección

B : valor promedio del background

I_M : cuentas del pico más intenso del perfil de difracción

4.- Estándar de Referencia Certificado.

Para el análisis de muestras por difracción de rayos X se utiliza el polvo de silicio de código 640e, el cual es un patrón de referencia certificado por National Institute of Standards & Technology (NIST), el cual nos permite verificar la posición y forma de los picos de difracción. Esto quiere decir, nos permite verificar si los goniómetros no están calibrados o si algún parámetro en el arreglo experimental no es óptimo.

Se verifico los siguientes valores de la posición de los picos:

$$\lambda = 0.15405929 \text{ nm}$$

Tabla N° 03. Valores de posición de picos del estándar de referencia.

h	k	l	2 θ
1	1	1	28.4
2	2	0	47.3
3	1	1	56.1
4	0	0	69.1
3	3	1	76.3
4	2	2	88.0
5	1	1	94.9
4	4	0	106.7
5	3	1	114.1
6	2	0	127.5

	FORMATO		Código : M2.2-F-094
	INFORME DE ANÁLISIS DE ARCILLAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X		Versión : 02
			Fecha aprob.: 17/07/2023
			Página : 1 de 3

I. DATOS GENERALES

<i>INFORME N° 017-2024-INGEMMET/DL-LRX</i>			
Solicitud N°	016-2024-INGEMMET/DL-ATTIG	Código interno	2024-0230
Proyecto	DL-ATTIG: ASISTENCIA TÉCNICA Y TECNOLÓGICA A LA INVESTIGACIÓN EN GEOCIENCIAS		
Jefe del proyecto	ANA LUZ CONDORHUAMAN SUAREZ		
Solicitante	LEÓN FERNANDO PÉREZ CHAUCA		
Realizado por	JOHNY JEFFERSON ATACHAHUA BLAS	Fecha	10/10/2024

II. DATOS DE LAS MUESTRAS


N° de muestras	05	Tipo de muestra	OTROS
Condiciones de ingreso de muestra a irradiar	POLVO		

III. DATOS Y CONDICIONES DEL EQUIPAMIENTO

Equipo	Difractómetro	Marca	Shimadzu	Modelo	XRD-7000
Tipo de ánodo	Cu	Corriente	30 mA	Voltaje	40 kV

IV. CONDICIONES DEL IRRADIACIÓN

RANGO DE BARRIDO (2 θ)			
De	3	Hasta	70
Rotación de la muestra	-	Velocidad (RPM)	-


 <small>SECTOR ENERGÍA Y MINAS</small> INGEMMET <small>INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO</small>	FORMATO	Código : M2.2-F-094
	INFORME DE ANÁLISIS DE ARCILLAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	Versión : 02 Fecha aprob.: 17/07/2023 Página : 2 de 3

V. RESULTADOS

CÓDIGO DE MUESTRA		CV-0	
Nº	MINERAL	FÓRMULA	%
1	Cuarzo	SiO ₂	92.23
2	Fengita	K _{0.95} Na _{0.05} Mg _{0.20} Fe _{0.28} Al _{2.27} Si _{3.25} O ₁₀ (OH) _{1.96} F _{0.04}	5.83
3	Hematita	Fe ₂ O ₃	1.94
Valor promedio del background		40	
Nº de cuentas del pico máximo		2656	
Error estadístico de conteo		3.80%	
OBSERVACIONES			
-			

CÓDIGO DE MUESTRA		CVM-A	
Nº	MINERAL	FÓRMULA	%
1	Cuarzo	SiO ₂	65.35
2	Sodalita	(Mg _{0.33} Na _{0.33}) ₆ (AlSiO ₄) ₆ (H ₂ O) ₆	17.32
3	Hidroxiancricita	Na ₆ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (OH) ₂ ·2H ₂ O	11.81
4	Sodalita	Na ₆ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (CO ₃) _{0.5} (OH)·3H ₂ O	5.52
Valor promedio del background		80	
Nº de cuentas del pico máximo		2002	
Error estadístico de conteo		4.38%	
OBSERVACIONES			
-			

CÓDIGO DE MUESTRA		CVM-B	
Nº	MINERAL	FÓRMULA	%
1	Cuarzo	SiO ₂	74.49
2	Sodalita	(Mg _{0.33} Na _{0.33}) ₆ (AlSiO ₄) ₆ (H ₂ O) ₆	10.2
3	Zeolita	Na ₁₂ (Al ₁₂ Si ₁₂ O ₄₈)(H ₂ O) ₂₇	9.18
4	Fengita	K _{0.95} Na _{0.05} Mg _{0.20} Fe _{0.28} Al _{2.27} Si _{3.25} O ₁₀ (OH) _{1.96} F _{0.04}	6.13
Valor promedio del background		60	
Nº de cuentas del pico máximo		2314	
Error estadístico de conteo		4.07%	
OBSERVACIONES			
-			



	FORMATO	Código : M2.2-F-094
	INFORME DE ANÁLISIS DE ARCILLAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	Versión : 02 Fecha aprob.: 17/07/2023 Página : 3 de 3

CÓDIGO DE MUESTRA		CVM-C	
Nº	MINERAL	FÓRMULA	%
1	Cuarzo	SiO ₂	52.45
2	Sodalita	Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (CO ₃) _{0.5} (OH)·3H ₂ O	27.27
3	Sodalita	Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ Cl	9.79
4	Fengita	K _{0.95} Na _{0.05} Mg _{0.20} Fe _{0.28} Al _{2.27} Si _{3.25} O ₁₀ (OH) _{1.96} F _{0.04}	6.29
5	Cancrinita	Na _{6.59} Ca _{0.95} Al ₆ (SiO ₄) ₆ (CO ₃) _{1.04} F _{0.41} (H ₂ O) ₂	4.2
Valor promedio del background		60	
N° de cuentas del pico máximo		1540	
Error estadístico de conteo		4.99%	
OBSERVACIONES			
-			

CÓDIGO DE MUESTRA		CVM-D	
Nº	MINERAL	FÓRMULA	%
1	Cuarzo	SiO ₂	62.99
2	Sodalita	Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (CO ₃) _{0.5} (OH)·3H ₂ O	23.62
3	Sodalita	Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ Cl	7.87
4	Fengita	K _{0.95} Na _{0.05} Mg _{0.20} Fe _{0.28} Al _{2.27} Si _{3.25} O ₁₀ (OH) _{1.96} F _{0.04}	5.52
Valor promedio del background		50	
N° de cuentas del pico máximo		1882	
Error estadístico de conteo		4.52%	
OBSERVACIONES			
-			

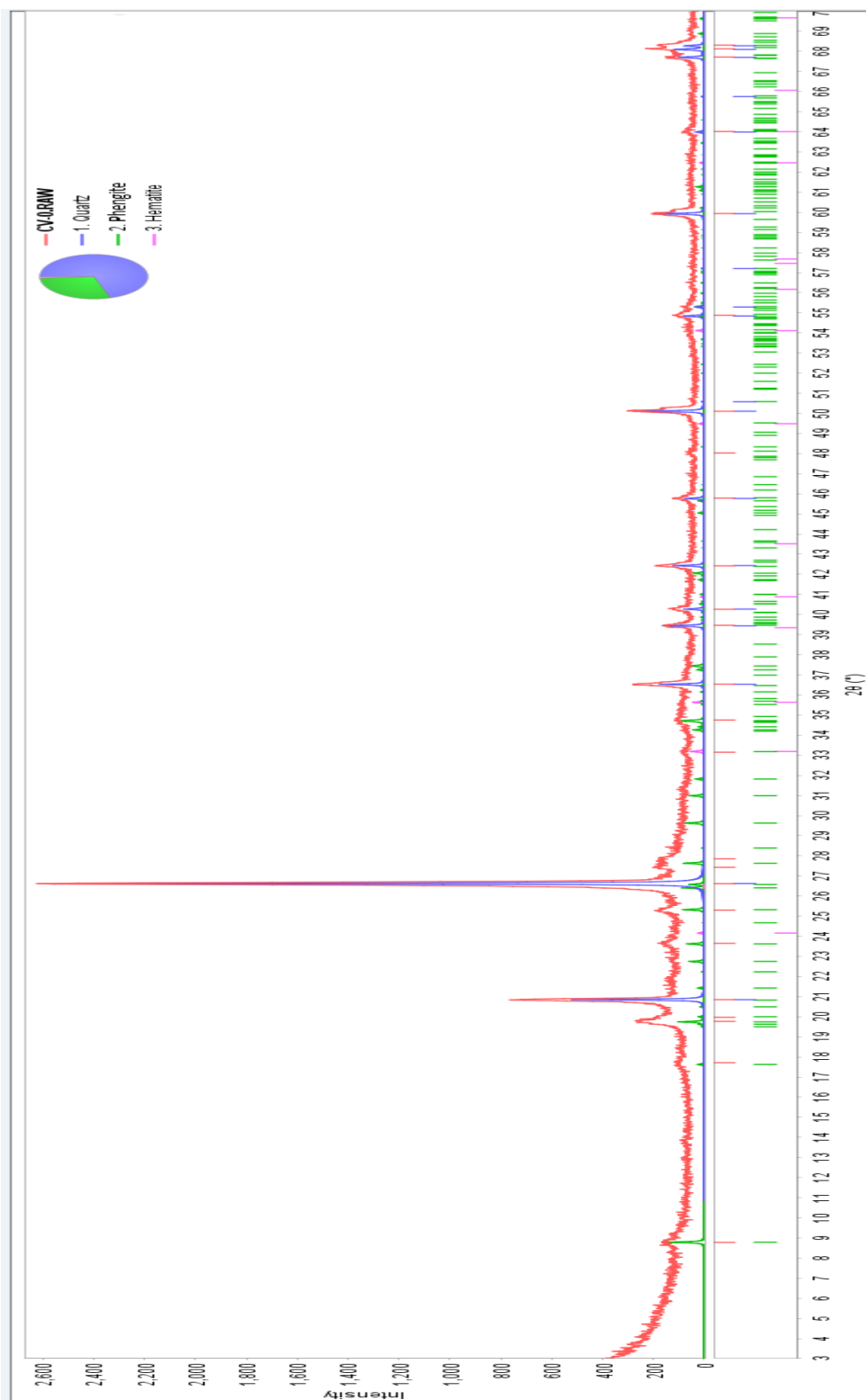
IV. COMENTARIOS / OBSERVACIONES

Sin observaciones.

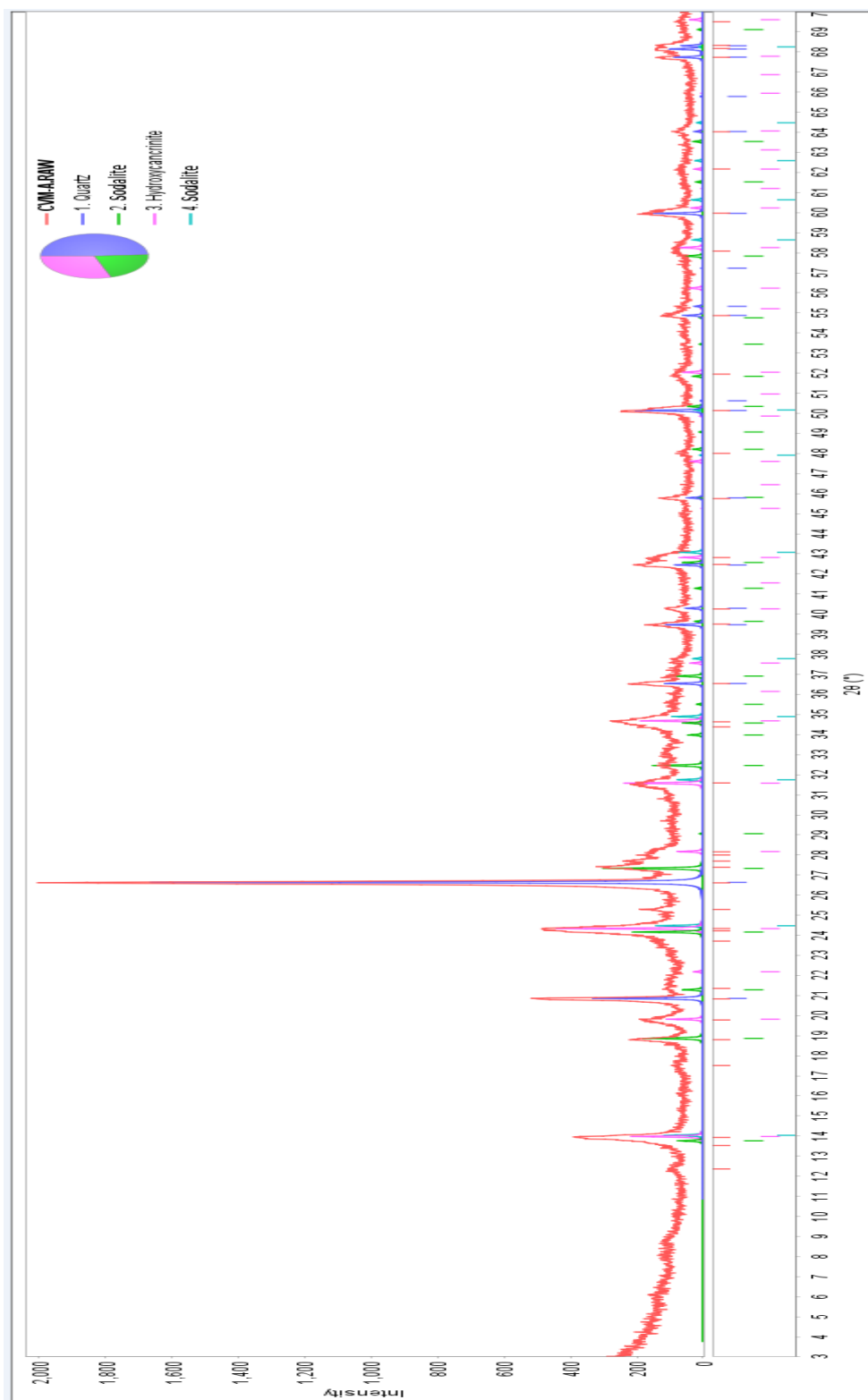
V°B° Responsable de Laboratorio de Rayos X	Firma del especialista
 <p>Firmado digitalmente por ZUMARAN ALAYZA Iván Daniel FAU 20112910277 ach Empresa: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico Motivo: Votación del 08/06/2023 Fecha: 2024/07/16 09:26:07-0500</p>	 <p>Firmado digitalmente por ATACHARELLA BLAS Johnny Jefferson FAU 20112910277 ach Empresa: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico Motivo: Firmar del 08/06/2023 Fecha: 2024/07/16 09:18:52-0500</p>

10.2. Difractogramas independientes

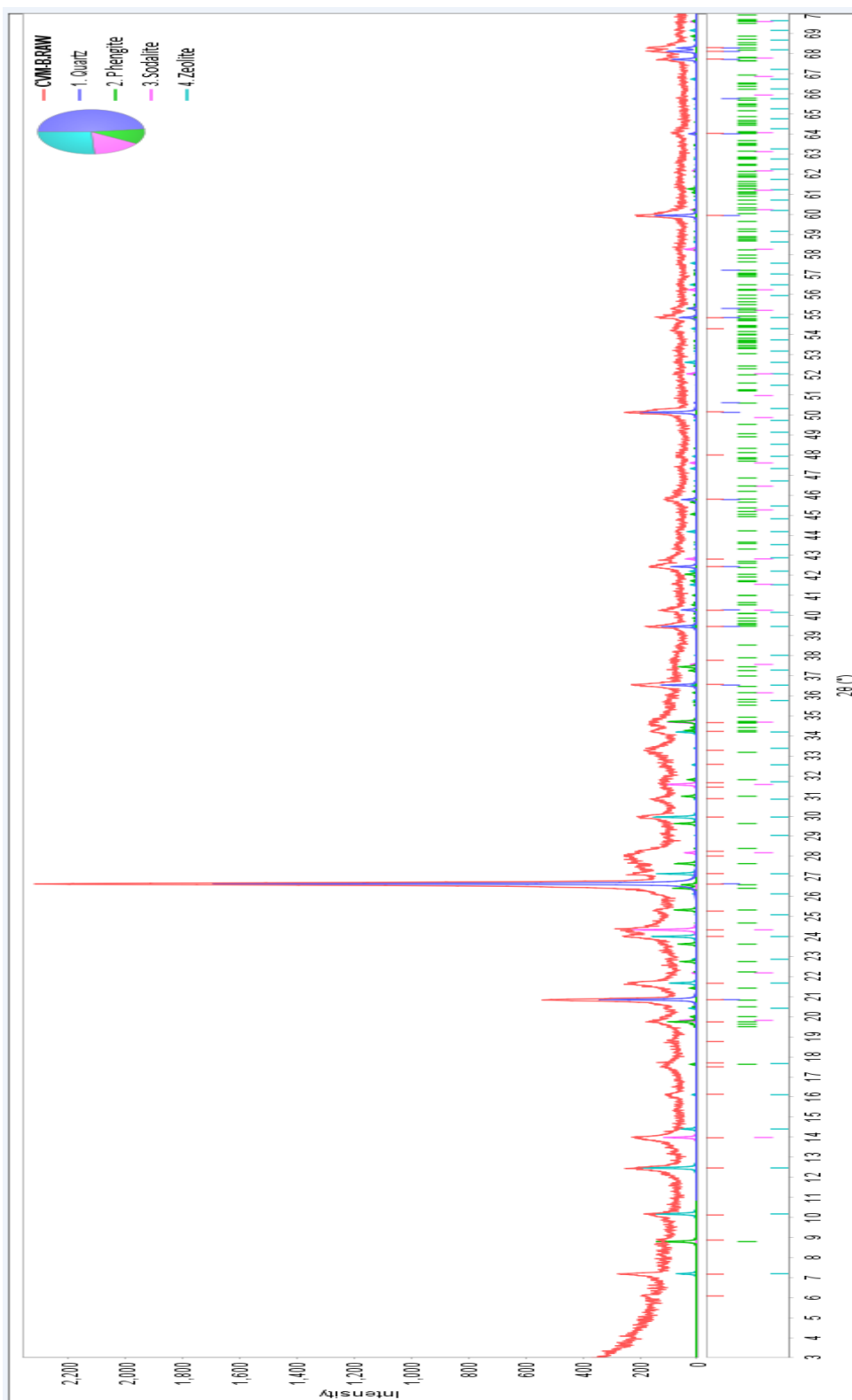
DIFRACTOGRAMA-Ceniza volante inicial (CV-0)



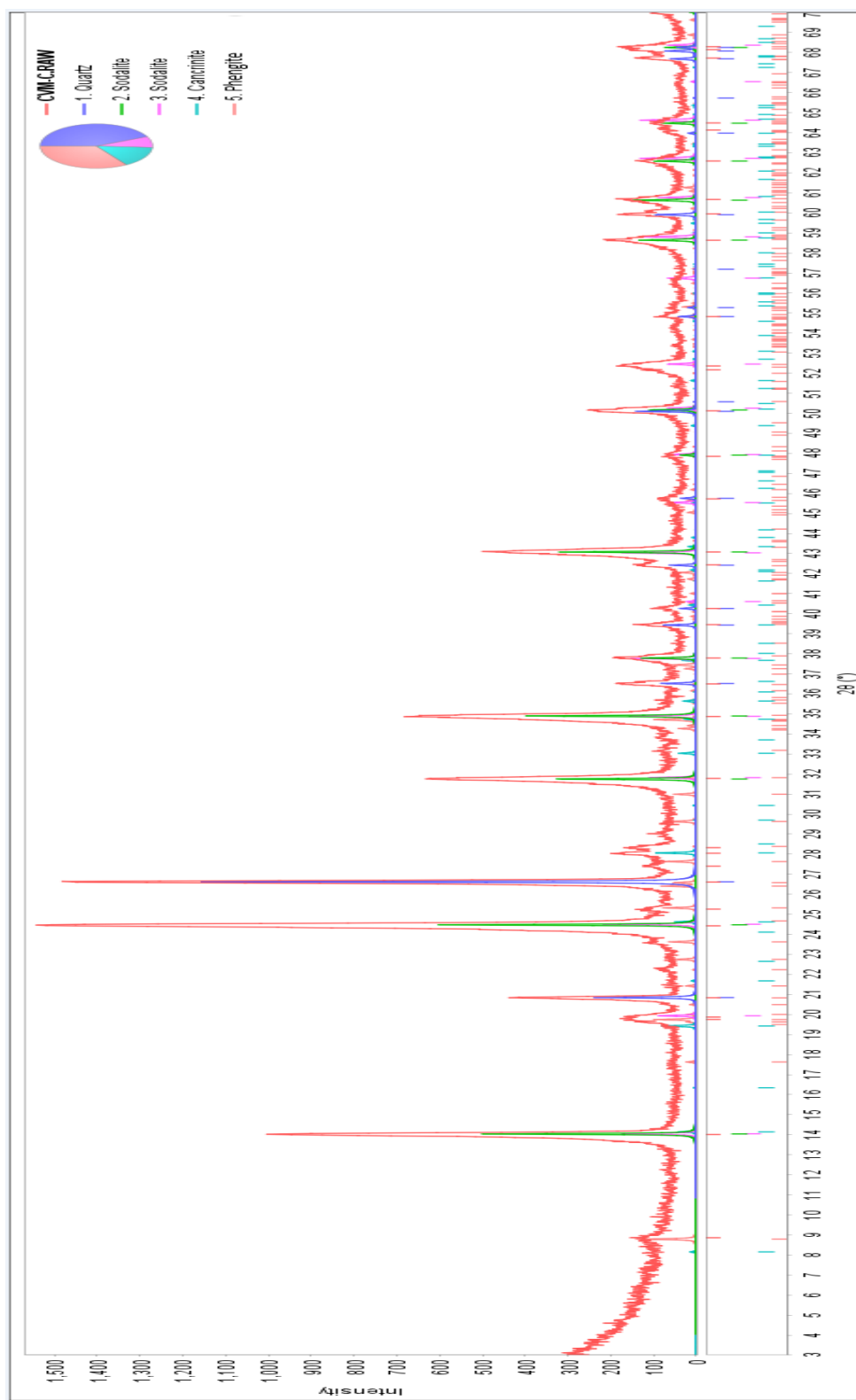
DIFRACTOGRAMA-Ceniza volante modificado A (CVM-A)



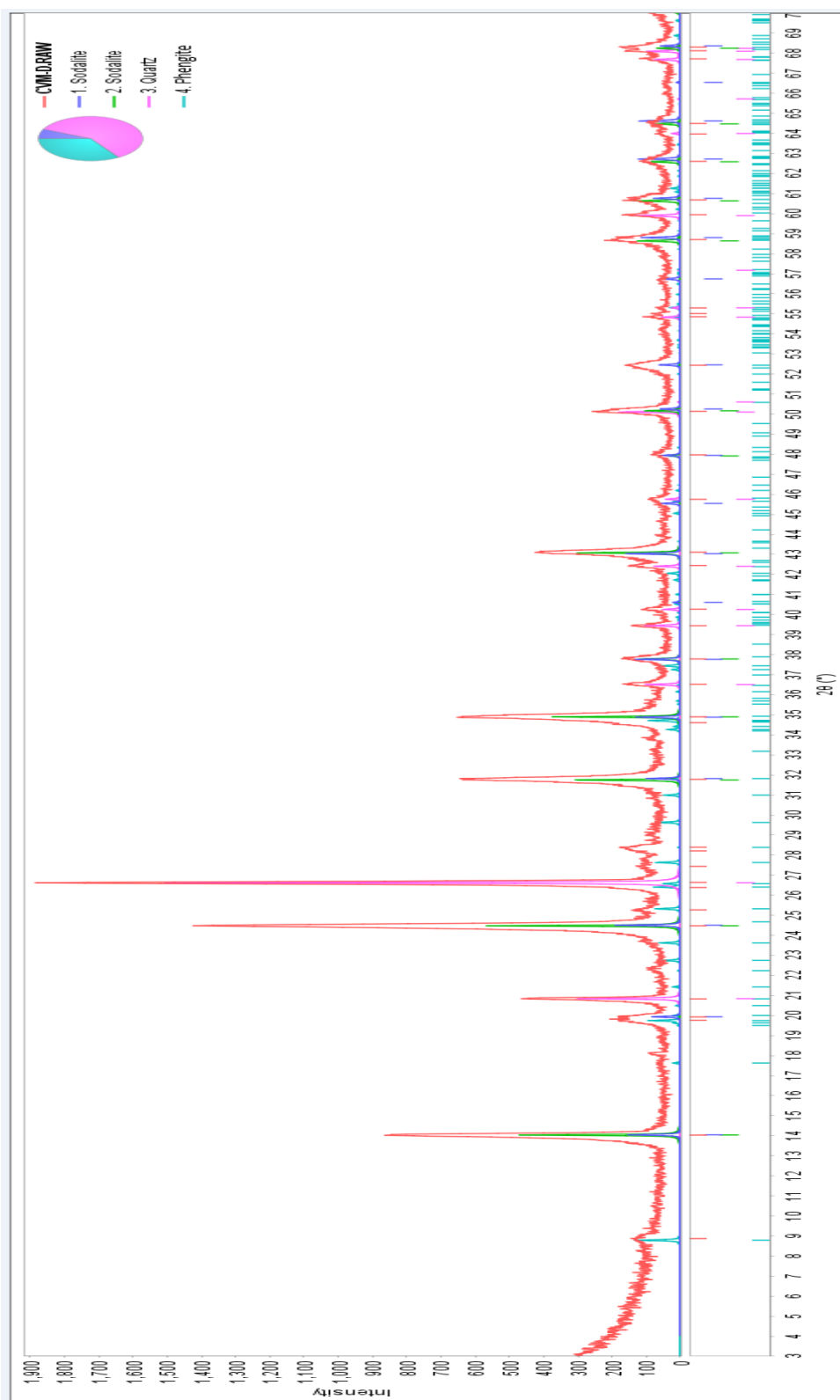
DIFRACTOGRAMA-Ceniza volante modificado B (CVM-B)



DIFRACTOGRAMA-Ceniza volante modificado C (CVM-C)



DIFRACTOGRAMA-Ceniza volante modificado D (CVM-D)



10.3. Resultados de Área Superficial por el Método BET (UNI-Lima)

MUESTRA BETCVM-i

Relative Pressure (p/p^0)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed ($\text{cm}^3/\text{g STP}$)
0.05043651	38.3317451	2.5074077
0.07826166	59.4788589	2.70388948
0.10607692	80.6184616	2.84507673
0.13395587	101.806458	2.9772718
0.16185442	123.009361	3.09102033
0.18947812	144.003372	3.20925636
0.21712731	165.016754	3.32741002
0.24509659	186.273407	3.44738245
0.27286542	207.377716	3.56185109
0.3006909	228.525085	3.69037459
0.33691744	256.057251	3.86974788
0.37285991	283.373535	4.0405664
0.40885251	310.727905	4.22078387
0.44499745	338.198059	4.41385725
0.48126939	365.76474	4.60265642
0.51745939	393.269135	4.80393164
0.55356425	420.708832	5.01189219
0.58941642	447.956482	5.23344197
0.62530241	475.229828	5.49589616
0.66121304	502.521912	5.78829416
0.69728771	529.93866	6.11859206
0.73343281	557.408936	6.54669173
0.76936405	584.716675	7.0432338
0.80517618	611.933899	7.66497729
0.84152551	639.559387	8.49851314
0.87761769	666.989441	9.60476215
0.9134976	694.258179	11.2717768
0.94947951	721.604431	14.0916953
0.98571946	749.14679	20.6546344
0.90996262	691.571594	12.1419402
0.83394687	633.799622	9.09938022
0.75794453	576.037842	7.54203598
0.68167235	518.070984	6.44414851
0.6059698	460.537048	5.6701038
0.52833513	401.534698	5.15361768
0.45380357	344.890717	4.3737429
0.37622098	285.927948	3.94033398
0.30005539	228.042099	3.56539886

MUESTRA BETCVM-A

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.0501625	38.123497	2.81034621
0.07794206	59.2359657	2.98238824
0.10578833	80.3991318	3.12013762
0.13367884	101.595917	3.26695031
0.16158024	122.80098	3.38629368
0.18920278	143.794113	3.49283352
0.21687676	164.82634	3.6032146
0.24478687	186.038025	3.71520176
0.27262007	207.191254	3.81341507
0.30042879	228.325882	3.93716322
0.33667996	255.87677	4.07746045
0.37262111	283.192047	4.22374587
0.40859945	310.535583	4.36570355
0.44473949	338.002014	4.52034482
0.48105955	365.605255	4.68464038
0.51721352	393.082275	4.86488526
0.55335661	420.551025	5.05753728
0.5892071	447.797394	5.2584961
0.62509376	475.071259	5.49545442
0.66106001	502.405609	5.78907287
0.69704325	529.752869	6.13114915
0.73321445	557.242981	6.57090507
0.76918793	584.582825	7.16945939
0.80501629	611.812378	7.98704213
0.84132498	639.406982	9.15907043
0.87742832	666.84552	10.8185213
0.91333843	694.137207	13.2350429
0.94931793	721.481628	17.0220384
0.98558253	749.042725	23.6616088
0.90987163	691.502441	16.0791718
0.83380055	633.688416	11.4344004
0.75783555	575.955017	8.63577737
0.68154514	517.974304	7.0170741
0.60582938	460.430328	6.0136427
0.52835806	401.552124	5.44231085
0.45366143	344.782684	4.71772949
0.37620203	285.913544	4.36897168
0.30144557	229.098633	4.08938325

MUESTRA BETCVM-B

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.05055466	38.4215431	4.1542902
0.07835903	59.5528641	4.36143395
0.10613658	80.6638031	4.52495522
0.13400463	101.843521	4.67804802
0.16192933	123.066292	4.82115043
0.18952823	144.041458	4.95393829
0.21715965	165.041336	5.08882604
0.24511821	186.289841	5.22424665
0.27291788	207.417587	5.35392067
0.30072995	228.554764	5.48762099
0.33694125	256.075348	5.64623873
0.37288236	283.390594	5.82546798
0.40890061	310.764465	6.02368631
0.44500194	338.201477	6.21287487
0.48131497	365.799377	6.3991034
0.5174567	393.26709	6.60425368
0.55361135	420.744629	6.82678096
0.58947573	448.001556	7.06823881
0.62534497	475.262177	7.34267496
0.66124404	502.545471	7.66739909
0.69728586	529.937256	8.07590634
0.73348092	557.445496	8.60912607
0.76945624	584.786743	9.30559521
0.80524453	611.98584	10.262272
0.84157281	639.595337	11.6466057
0.87766362	667.024353	13.537582
0.91355294	694.300232	16.2593361
0.94951132	721.628601	19.7966258
0.98577881	749.191895	25.9056431
0.9102368	691.779968	18.8155096
0.83395908	633.808899	14.4148132
0.75797167	576.058472	11.2547676
0.68168712	518.082214	9.23438553
0.60459422	459.491608	7.90682438
0.52836561	401.557861	7.17430815
0.45236981	343.801056	6.1065378
0.37623223	285.936493	5.66410925
0.30002724	228.020706	5.28292849

MUESTRA BETCVM-C

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.05025685	38.1952057	1.34008219
0.07812524	59.3751831	1.45971521
0.10588587	80.473259	1.56128774
0.13376398	101.660622	1.64052011
0.16169739	122.890015	1.71866886
0.18926998	143.845184	1.79874558
0.21695083	164.882629	1.87979095
0.2449491	186.161316	1.9510774
0.27269883	207.251114	2.0184418
0.3005513	228.418991	2.08602076
0.33677683	255.950394	2.17104721
0.37272134	283.268219	2.26320333
0.40872229	310.628937	2.35840947
0.44485365	338.088776	2.45345769
0.48111889	365.65036	2.55027512
0.51731511	393.159485	2.65162308
0.55346037	420.629883	2.77098519
0.5893274	447.888824	2.90698773
0.62516162	475.122833	3.03404026
0.66113711	502.464203	3.18005526
0.69710838	529.802368	3.34035475
0.73331732	557.321167	3.5301656
0.76933361	584.693542	3.75643415
0.80508166	611.862061	4.04829154
0.84148383	639.52771	4.45658082
0.87753224	666.9245	5.08533496
0.91348138	694.24585	6.1695378
0.94937881	721.527893	8.13414531
0.98573769	749.160645	12.736229
0.90999378	691.595276	6.65565746
0.83381645	633.7005	4.66118153
0.75788582	575.993225	3.86749229
0.68162504	518.035034	3.41324049
0.60593531	460.510834	3.11362659
0.52840315	401.586395	2.87418682
0.45232403	343.766266	2.62758884
0.3762815	285.973938	2.45579668
0.30005943	228.045166	2.29616386

MUESTRA BETCVM-D

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.05006579	38.0500031	1.9714092
0.07793787	59.2327805	2.08266209
0.10571609	80.3442307	2.17146648
0.13362186	101.552612	2.25198119
0.16152493	122.758949	2.31860789
0.18915919	143.760986	2.38505319
0.21683803	164.796906	2.44286643
0.2447981	186.046555	2.50474939
0.2725227	207.117249	2.56558205
0.30039444	228.299774	2.63295299
0.33662601	255.83577	2.7155819
0.37253631	283.127594	2.80503813
0.4085609	310.506287	2.89686439
0.44468303	337.959106	2.98646759
0.48098181	365.546173	3.08496168
0.51715638	393.038849	3.19874205
0.55327401	420.488251	3.31686866
0.58912313	447.733582	3.45080084
0.62500558	475.004242	3.59559005
0.66090702	502.289337	3.76009451
0.69695105	529.6828	3.95922791
0.73316923	557.208618	4.1892055
0.76905871	584.484619	4.47988483
0.80493855	611.753296	4.85374176
0.8412123	639.32135	5.38986459
0.87733612	666.775452	6.19759679
0.91322833	694.053528	7.51584578
0.94920413	721.395142	9.87420888
0.98549853	748.978882	15.5221251
0.90961352	691.306274	8.14283765
0.83366346	633.584229	5.65451846
0.75765421	575.8172	4.57996103
0.6813997	517.86377	3.92330373
0.60571241	460.341431	3.57218366
0.52833276	401.532898	3.24014224
0.45354128	344.691376	2.81031409
0.37734383	286.781311	2.57877128
0.30127011	228.965286	2.39439588

10.4. Resultados de la concentración inicial y final de iones Ni (II) y Pb (II)



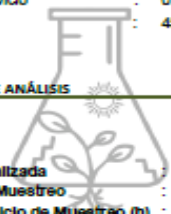
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



INFORME DE ENSAYO
N° 060018-25NA/AG/ LABSAF - CANAAN

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Lheonel Conde Vera
 Propietario / Productor : Lheonel Conde Vera
 Dirección del cliente : Jr Las Palmeras Sector 4 Mz W Lte 1
 Solicitado por : Lheonel Conde Vera
 Muestreado por : Lheonel Conde Vera
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente
 Procedencia de muestra(s) : UNSCH-Ayacucho-Huamanga-Ayacucho
 Fecha(s) de muestreo : 45810
 Fecha de recepción de muestra(s) : 45817
 Lugar de ensayo : Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliaves - LABSAF Canaan
 Fecha(s) de análisis : 45817
 Cotización del servicio : 072-25-CA
 Fecha de emisión : 45817



Pro Suelos y Aguas

LABSAF

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

Matriz Analizada : AGUA
 Fecha de Muestreo : 2/06/2025
 Hora de Inicio de Muestreo (h) : 12:00:00

ITEM	Código de Laboratorio	Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	Niquel (Ni) ppm
1	AG022-CA-25	RNI-0-0-0	115.63
2	AG023-CA-25	RNI-0-30-800	109.04
3	AG024-CA-25	RNI-0-60-1000	108.91
4	AG025-CA-25	RNI-0-90-1200	111.05

ITEM	Código de Laboratorio	Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	Plomo (Pb) ppm
1	AG026-CA-25	RPb-0-0-0	91.75
2	AG027-CA-25	RPb-0-30-800	75.68
3	AG028-CA-25	RPb-0-60-1000	76.02
4	AG029-CA-25	RPb-0-90-1200	76.02

ITEM	Código de Laboratorio	Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	Niquel (Ni) ppm
1	AG030-CA-25	RNI-0	115.63
2	AG031-CA-25	R NI-1	101.61
3	AG032-CA-25	R NI-2	103.55
4	AG033-CA-25	R NI-3	98.13
5	AG034-CA-25	R NI-4	104.67
6	AG035-CA-25	R NI-5	97.54
7	AG036-CA-25	R NI-6	96.55
8	AG037-CA-25	R NI-7	102.79
9	AG038-CA-25	R NI-8	100.47
10	AG039-CA-25	R NI-9	102.32



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



INFORME DE ENSAYO
N° 060018-25NA/AG/ LABSAF - CANAAN

ITEM	Código de Laboratorio	Código identificación de la Muestra por el Cliente	Plomo (Pb) ppm
1	AG040-CA-25	RPb-0	91.75
2	AG041-CA-25	R Pb-1	0.40
3	AG042-CA-25	R Pb-2	1.50
4	AG043-CA-25	R Pb-3	0.44
5	AG044-CA-25	R Pb-4	0.19
6	AG045-CA-25	R Pb-5	0.13
7	AG046-CA-25	R Pb-6	0.39
8	AG047-CA-25	R Pb-7	0.22
9	AG048-CA-25	R Pb-8	0.64
10	AG049-CA-25	R Pb-9	0.81

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Metales en Agua por MFAES	Acid Digestion/Inductively coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry, 2023

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que Ingreso la Muestras: Buenas Condicio
- Este Informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin
- Los resultados se relacionan solamente con los Items sometido
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibier
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado an
- El Laboratorio no es responsable cuando la información propor:

(*) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el labo

(**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: *Kattia Mendoza Dávalos- Responsable del LABSAF - CANAAN*



Firmado digitalmente por:
MENDOZA DAVALOS Katia FAU
20131365994 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 10/06/2025 09:48:05-0500

Firma

FIN DEL ENSAYO

10.5. Resultados del porcentaje de retención de iones Ni (II) y Pb (II)

Resultados del porcentaje de retención de Ni (II)

Ensayo	Muestra	Tiempo de agitación (min)	Velocidad de agitación (rpm)	[Ni ²⁺] _f ppm	% retención
1	RNi-1	90	1200	101,61	12,12%
2	RNi-2	30	1200	103,55	10,45%
3	RNi-3	30	800	98,13	15,13%
4	RNi-4	90	1000	104,67	9,48%
5	RNi-5	60	1200	97,54	15,64%
6	RNi-6	30	1000	96,55	16,50%
7	RNi-7	60	1000	102,79	11,10%
8	RNi-8	60	800	100,47	13,11%
9	RNi-9	90	800	102,32	11,51%

[Ni²⁺] inicial = 115,63 ppm

Resultados del porcentaje de retención de Pb (II)

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	[Pb ²⁺] _f ppm	% retención
1	R Pb-1	60	1000	0,40	99.56%
2	R Pb-2	90	1200	1,50	98.37%
3	R Pb-3	30	1000	0,44	99.52%
4	R Pb-4	30	800	0,19	99.79%
5	R Pb-5	90	800	0,13	99.86%
6	R Pb-6	60	800	0,39	99.58%
7	R Pb-7	30	1200	0,22	99.76%
8	R Pb-8	60	1200	0,64	99.30%
9	R Pb-9	90	1000	0,81	99.12%

[Pb²⁺] inicial = 91,75 ppm

10.6. Resultados de pH en el proceso de retención de iones Ni (II) y Pb (II)

Valores de pH en el proceso de retención-Ni (II)

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	pH _f
1	RNi-1	90	1200	6,71
2	RNi-2	30	1200	6,76
3	RNi-3	30	800	6,8
4	RNi-4	90	1000	6,70
5	RNi-5	60	1200	6,28
6	RNi-6	30	1000	6,77
7	RNi-7	60	1000	6,81
8	RNi-8	60	800	6,80
9	RNi-9	90	800	6,82
Promedio de pH				6,72

pH inicial = 5,54

Valores de pH en el proceso de retención-Pb (II)

Ensayo	Muestra	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	pH _f
1	R Pb-1	60	1000	6,92
2	R Pb-2	90	1200	6,72
3	R Pb-3	30	1000	6,89
4	R Pb-4	30	800	6,96
5	R Pb-5	90	800	6,75
6	R Pb-6	60	800	7,07
7	R Pb-7	30	1200	6,75
8	R Pb-8	60	1200	6,77
9	R Pb-9	90	1000	6,58
Promedio de pH				6,82

pH inicial = 4,75

10.7. Galería de fotos

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

FOTO 1: DIFRACTOMETRO DE RAYOS X MINIFLEX DE LA MARCA RIGAKU



FOTO 2: EQUIPO BET-MICROMERITICS GEMINI-VII 2390 SERIE T



**FOTO 3: ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ICP-OES TECNOLOGÍA DUAL
VIEW CON VISIÓN RADIAL Y AXIAL**



FOTOGRAFÍAS DE LA INVESTIGACIÓN

Foto 4: CARBÓN MINERAL (ANTRACÍTICO)



Foto 5: APLICACIÓN DEL CARBÓN MINERAL



Foto 6: CENIZAS DE CARBÓN MINERAL



Foto 7: TOMA DE MUESTRAS DE CENIZAS



Foto 8: MUESTRAS DE CENIZAS DE CARBÓN MINERAL



Foto 9: TAMIZADO DE LAS CENIZAS



Foto 10: LAVADO DE LAS CENIZAS VOLANTES**Foto 11: SECADO DE LAS CENIZAS VOLANTES**

Foto 12: PROCESO DE LA RETENCIÓN DE Ni (II) y Pb (II)



Foto 13: FILTRADO DE LAS CENIZAS VOLANTES MODIFICADAS LUEGO DE LA REMOCIÓN DE IONES Ni (II) Pb (II)



**Foto 14: MUESTRAS DE CENIZAS VOLANTES PARA DETERMINAR
ÁREA SUPERFICIAL (BET) Y DRX**

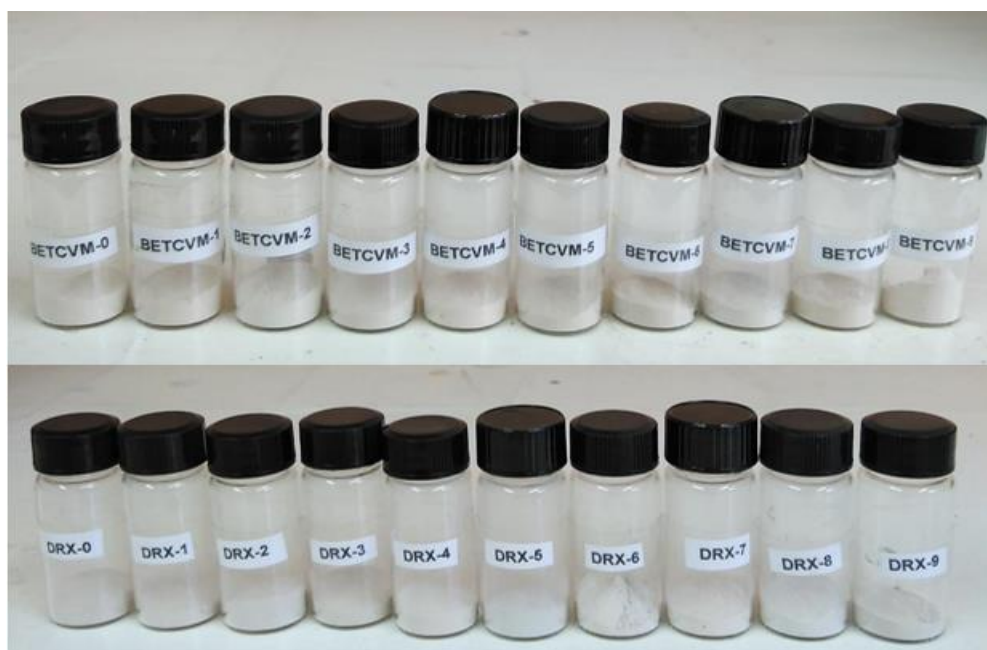


Foto 15: MUESTRAS DE SOLUCIONES REMANENTES DE IONES Ni (II) y Pb

(II)



**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)

Expositor: Josue Leonardo Perez Mancilla
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2534919

Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 18-07-2025

En la Sala de Conferencias "Pedro VILLENA HIDALGO" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las ocho de la mañana con cinco minutos del día viernes veinticinco de julio del año dos mil veinticinco, se reunieron el Bachiller en Ingeniería Química **Josue Leonardo Perez Mancilla**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO, Mg. Pedro INGA ZARATE (Miembros) y Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente) y el público asistente.

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)**, presentado por el Bachiller **Josue Leonardo Perez Mancilla**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó al Bachiller **Josue Leonardo Perez Mancilla**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de cuarenta y cinco minutos.

Terminada la exposición del Bachiller, el Presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA, Mg. Pedro INGA ZARATE y Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO.

Concluyó con esta etapa el Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA, en su condición de Presidente.

**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)**Expositor: Josue Leonardo Perez Mancilla
Bachiller en Ingeniería Química**

Expediente N° 2534919

Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 18-07-2025

Culminada la etapa de preguntas, el Presidente del Jurado invitó al Sustentante y al público para que se sirvan abandonar la Sala de Conferencias con la finalidad de permitir al Jurado de Sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADO POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISEIS (16)**.

Finalmente el Presidente del Jurado dispuso que se invite al Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la Sala de Conferencias, y anunció que el Bachiller **Josue Leonardo Perez Mancilla**, ha resultado **APROBADO POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con un flamante **INGENIERO QUÍMICO** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las diez de la mañana con quince minutos, se dio por concluido el acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


.....
Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente
.....
Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO
Miembro
.....
Mg. Pedro INGA ZARATE
Miembro
.....
Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA
Miembro-Asesor
.....
Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
Secretario DocenteFACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA
Av. Independencia s/n
Ciudad Universitaria

**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)**Expositor: Lheonel Conde Vera**
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2534919

Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 18-07-2025

En la Sala de Conferencias "Pedro VILLENA HIDALGO" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las ocho de la mañana con cinco minutos del día viernes veinticinco de julio del año dos mil veinticinco, se reunieron el Bachiller en Ingeniería Química **Lheonel Conde Vera**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO, Mg. Pedro INGA ZARATE (Miembros) y Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente) y el público asistente.

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)**, presentado por el Bachiller **Lheonel Conde Vera**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó al Bachiller **Lheonel Conde Vera**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de cuarenta y cinco minutos.

Terminada la exposición del Bachiller, el Presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA, Mg. Pedro INGA ZARATE y Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO.

Concluyó con esta etapa el Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA, en su condición de Presidente.

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA
Av. Independencia s/n
Ciudad Universitaria



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS PRESENCIAL:
(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)

Expositor: Lheonel Conde Vera
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2534919 Resolución Decanal N° 074-2025-UNSCH-FIQM/D Fecha: 18-07-2025

Culminada la etapa de preguntas, el Presidente del Jurado invitó al Sustentante y al público para que se sirvan abandonar la Sala de Conferencias con la finalidad de permitir al Jurado de Sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADO POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISEIS (16).**


Finalmente el Presidente del Jurado dispuso que se invite al Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la Sala de Conferencias, y anunció que el Bachiller **Lheonel Conde Vera**, ha resultado **APROBADO POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con un flamante **INGENIERO QUIMICO** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

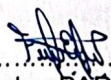
Siendo las diez de la mañana con quince minutos, se dio por concluido el acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


.....
Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente


.....
Mg. Tarcila ALCARRAZ ALFARO
Miembro


.....
Mg. Pedro INGA ZARATE
Miembro


.....
Dr. León Fernando PEREZ CHAUCA
Miembro-Asesor


.....
Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
Secretario Docente

**UNSCH****FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA****ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA****CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 008-2025-UNSCH-FIQM/EPIQ**

El que suscribe, Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte de los Bachilleres **Josue Leonardo PEREZ MANCILLA** y **Lheonel CONDE VERA**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de lones Niquel (II) y Plomo (II)

Autores Bach. : Josue Leonardo PEREZ MANCILLA y Lheonel CONDE VERA
Identificado : 2723875473
Fecha : 01 de agosto de 2025
Archivo : Tesis

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **22 (VEINTIDOS) % de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 07 de agosto de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Escuela de Formación Profesional
de Ingeniería Química

Dr. Guido Palomino Hernández
DIRECTOR

Adjunto Reporte de Índice de Similitud
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA Av. Independencia S/N –
Ayacucho Telf. 066-312510 Anexo. 152 Correo:
ep.quimica@unsch.edu.pe

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)

por Josue Leonardo PEREZ MANCILLA y Lheonel CONDE VERA

Fecha de entrega: 01-ago-2025 04:19p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2723875473

Nombre del archivo: as_para_modificar_el_rea_superficial_de_las_cenizas_volantes.pdf (15.56M)

Total de palabras: 21241

Total de caracteres: 114507

Condiciones adecuadas para modificar el área superficial de las cenizas volantes para su aplicación en la retención de Iones Niquel (II) y Plomo (II)

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

15%

2

Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

4%

3

qdoc.tips

Fuente de Internet

1%

4

patents.google.com

Fuente de Internet

<1%

5

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

6

ebin.pub

Fuente de Internet

<1%

7

editorial.ucentral.edu.co

Fuente de Internet

<1%

8

Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA

Trabajo del estudiante

<1%

9

Diaz, Christhel Alejandra Andrade. "Remocion De Oxitetraciclina Presente En Soluciones Acuosas Usando Cenizas De cascara De Arroz", Instituto Politecnico de Leiria (Portugal), 2021

Publicación

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo