

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE ADSORCIÓN DE  $Pb^{2+}$  EN SOLUCIONES  
ACUOSAS UTILIZANDO LA NANOARCILLA (BENTONITA)  
DEL DISTRITO IGNACIO ESCUDERO- SULLANA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**MENDOZA CERNA MARVIN PAUL**

**ASESOR**

**Ing. GUMERCINDO HUAMANÍ TAIPE**

**CALLAO, 2018**

**PERÚ**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por el señor Bachiller **MENDOZA CERNA MARVIN PAUL** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Ing. JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ PRESIDENTE

Ing. MARÍA ESTELA TOLEDO PALOMINO SECRETARIA

Ing. VICTORIA YSABEL ROJAS VOCAL

Ing. GUMERCINDO HUAMANÍ TAÍPE ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 1 de Tesis con Ciclo de Tesis Folio N° 37 y Acta N° 36 de fecha **VEINTISÉIS DE NOVIEMBRE DE 2018**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 309–2017–CU de fecha 24 de octubre de 2017 y su Cuarta Disposición Transitoria.

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por ser el centro de mi vida y la razón de todas las metas que he logrado y cumplido hasta el momento.

### **A MI FAMILIA**

Por darme su apoyo en cada etapa de mi vida, sin ellos no lo hubiese logrado.

### **A THANIA CAMILA RAMOS CERNA**

Por darme fuerza, motivación y apoyo en esta etapa importante de mi vida.

### **AL Ing. GUMERCINDO HUAMANÍ TAIPE**

Por haberme guiado y ayudado a cumplir este sueño, brindándome sus conocimientos y tiempo para el desarrollo de esta investigación.

## **AGRADECIMIENTO**

### **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

Por brindarme cada uno de los recursos que utilice durante la carrera y ser una importante influencia en mi vida.

### **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

Por haber sido mí segundo hogar durante los años de estudio y haberme dado el conocimiento necesario para ser un profesional

# INDICE

<b>I.</b>	<b>PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>5</b>
1.1	Descripción de la realidad problemática	9
1.2	Formulación del problema	9
1.2.1	Problema general	9
1.2.2	Problemas específicos	10
1.3	Objetivos de la investigación	10
1.3.1	Objetivo general	10
1.3.2	Objetivos específicos	10
1.4	Limitantes de investigación	10
<b>II.</b>	<b>MARCO TEORICO</b>	<b>12</b>
2.1.	Antecedentes del estudio	12
2.2.	Marco Teórico científico	15
2.2.1.	Adsorción	15
2.2.2.	Arcilla	18
2.2.3.	Bentonita	18
2.2.4.	Nanoarcilla	20
2.2.5.	Metales pesados	22
2.2.6.	Generalidades del Plomo	22
2.2.7.	Procesos para la eliminación de metales tóxicos	25
2.2.8.	Consecuencia de las variables de la adsorción	26
2.2.9.	Cinética de adsorción	27
2.2.10.	Isotermas de Adsorción	28
2.3.	Definiciones de términos básicos	29
<b>III.</b>	<b>VARIABLES E HIPÓTESIS</b>	<b>31</b>
3.1.	Hipótesis	31
3.1.1.	Hipótesis general	31
3.1.2.	Hipótesis específicas	31
3.2.	Operacionalización de variables	31
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>33</b>

4.1. Tipo y diseño de investigación.	33
4.2. Población y muestra	35
4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
4.4. Análisis y procesamiento de datos	41
<b>V. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
5.1. Resultados descriptivos	47
5.2. Resultados inferenciales	56
<b>VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>63</b>
6.1. Contrastación de la hipótesis	63
6.2. Contrastación de resultados con otros estudios	65
6.3. Responsabilidad ética	67
<b>VII. CONCLUSIONES</b>	<b>68</b>
<b>VIII. RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>73</b>

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
<b>Tabla N°2.1</b> CONSTITUYENTES DE LA BENTONITA	19
<b>Tabla N°2.2</b> DIVISION DE PELIGROSIDAD DE LOS METALES	23
<b>Tabla N°2.3</b> EL PLOMO Y SUS PROPIEDADES QUIMICAS	23
<b>Tabla N°2.4</b> LÍMITES MÁXIMOS ADMISIBLES DE METALES	25
<b>Tabla N°2.5</b> MÉTODOS TRADICIONES PARA EL TRATAR EL AGUA	26
<b>Tabla N°3.1</b> OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	32
<b>Tabla N°4.1</b> MATERIA PRIMA, INSUMOS Y REACTIVO	36
<b>Tabla N°4.2</b> VARIABLES PARA LA MASA ÓPTIMA	43
<b>Tabla N°4.3</b> VARIABLES PARA EL PH Y TIEMPO DE CONTACTO	44
<b>Tabla N°4.4</b> VARIABLES DEL MODELO ISOTERMICO	45
<b>Tabla N°5.1</b> CUADRO DE COMPONENTES DE LA BENTONITA	47
<b>Tabla N°5.2</b> DETERMINACION DE LA MASA ÓPTIMA	48
<b>Tabla N°5.3</b> RESULTADOS DE LAS VARIABLES ESPECÍFICAS	49
<b>Tabla N°5.4</b> RESULTADOS DE ANALISIS pH = 4	50
<b>Tabla N°5.5</b> RESULTADOS DE ANALISIS pH = 6	51
<b>Tabla N°5.6</b> RESULTADOS DE ANALISIS pH = 8	52
<b>Tabla N°5.7</b> VALORES DE LA ISOTERMA DE ADSORCION	53
<b>Tabla N°5.8</b> VALORES DE LA ISOTERMA DE LANGMUIR	54
<b>Tabla N°5.9</b> VALORES DE LA ISOTERMA DE FREUNDLICH	55
<b>Tabla N°5.10</b> VALORES DEL RESUMEN DEL DISEÑO	56
<b>Tabla N°5.11</b> VALORES DE INFORMACION DEL FACTOR	56
<b>Tabla N°5.12</b> RESULTADOS DE INFORMACIÓN DEL FACTOR	57
<b>Tabla N°5.13</b> VALORES DE LANGMUIR Y FREUNDLICH	65

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
<b>Figura N° 2.1</b> MOLECULAS CON PROPIEDADES DE ADSORCION	16
<b>Figura N° 2.2</b> ADSORCION DE NITROGENO CON EL AIRE	17
<b>Figura N° 2.3</b> BENTONITA NATURAL	18
<b>Figura N° 2.4</b> INTERCAMBIO DE CATION INORGANICO Y ORGANICO	20
<b>Figura N° 2.5</b> ETAPA DE MONTMORILLONITA HASTA NANOARCILLA	20
<b>Figura N° 2.6</b> DISTANCIA ENTRE CAPAS CON MONÓMEROS	21
<b>Figura N° 2.7</b> MODIFICACIÓN POR CATIONES ORGANICOS	21
<b>Figura N° 3.1</b> DEFINICION DE VARIABLES	31
<b>Figura N° 4.1</b> DISEÑO PARA DETERMINAR LA MASA OPTIMA	34
<b>Figura N° 4.2</b> DISEÑO PARA EVALUAR EL PH Y TIEMPO DE CONTACTO	34
<b>Figura N° 4.3</b> DISEÑO PARA DETERMINAR EL MODELO ISOTERMICO	34
<b>Figura N°4.4</b> IMAGEN SATELITAL DE IGNACIO ESCUDERO	35
<b>Figura N° 4.5</b> MATERIA PRIMA	37
<b>Figura N° 4.6</b> HUMECTACION DE LA BENTONITA NATURAL	37
<b>Figura N° 4.7</b> MEZCLA DE LA BENTONITA NATURAL	38
<b>Figura N° 4.8</b> BROMURO DE HEXADECILTRIMETILAMONIO	38
<b>Figura N° 4.9</b> PROCESO DE LA BENTONITA NATURAL MODIFICADA	39
<b>Figura N° 4.10</b> NANOARCILLA MODIFICADA	39
<b>Figura N° 4.11</b> FILTRACION AL VACIO	40
<b>Figura N° 4.12</b> OBTENCION POR FILTRACION AL VACIO	40
<b>Figura N° 4.13</b> PROCESO DE LA FILTRACION AL VACIO	41
<b>Figura N° 4.14</b> PROCESO DE SECADO DE LA NANOARCILLA	42



<b>Figura N° 4.15</b>	PROCESO DE SECADO Y PULVERIZADO	42
<b>Figura N° 4.16</b>	PROCESO DE LA NANOARCILLA A DIFERENTES PESOS	43
<b>Figura N° 4.17</b>	PROCESO DE CENTRIFUGACION	43
<b>Figura N° 5.1</b>	CURVA DE DETERMINACION DE LA MASA ÓPTIMA	48
<b>Figura N° 5.2</b>	CURVA DE ANALISIS pH = 4	50
<b>Figura N° 5.3</b>	CURVA DE ANALISIS pH = 6	51
<b>Figura N° 5.4</b>	CURVA DE ANALISIS pH = 8	52
<b>Figura N° 5.5</b>	CURVA DE REMOCION	53
<b>Figura N° 5.6</b>	CURVA DE ISOTERMA DE ADSORCION	53
<b>Figura N° 5.7</b>	CURVA DE ISOTERMA DE LANGMUIR	54
<b>Figura N° 5.8</b>	CURVA DE ISOTERMA DE FREUNDLICH	55
<b>Figura N° 5.9</b>	DIAGRAMA DE PARETO	58
<b>Figura N° 5.10</b>	GRAFICA DE PROBABILIDAD NORMAL	59
<b>Figura N° 5.11</b>	HISTOGRAMA DE RESIDUOS	60
<b>Figura N° 5.12</b>	GRAFICA DE EFECTOS PRINCIPALES % PLOMO	61
<b>Figura N° 5.13</b>	GRAFICA DE INTERACCION % PLOMO	62

## RESUMEN

En los últimos años, los estudios han demostrado que el aumento en los niveles de contaminación del agua se debe a la presencia de metales pesados procedentes de efluentes industriales como minería ilegal, baterías, municiones y cerámica de vidrio, lo que pone en riesgo la salud humana y el medio ambiente. Por lo tanto, los metales pesados como el plomo, el cadmio y el mercurio se consideran uno de los grupos más peligrosos debido a su alta toxicidad a bajas concentraciones y su capacidad de acumularse en los organismos que los ingieren. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) clasificó y determinó que los metales pesados entre son los más peligrosos para la salud humana y a la vez estableció el límite máximo permitido de plomo en el agua potable de 0,001 ppm.

En esta reciente investigación se ha empleado un diseño experimental para determinar la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  a través de la nanoarcilla (bentonita) intercalada con aminas. La adsorción de  $Pb^{2+}$  se cuantificó por "Absorción Atómica", encontrando que el mayor porcentaje de eliminación fue 96,4162% bajo las condiciones de pH igual a 8 y el peso del adsorbente de 3,7 g.

El modelo isotérmico de adsorción que mejor se describe y, al mismo tiempo, ajustada, es la de Langmuir.

## **ABSTRACT**

In the last few years, studies have shown that the increase in levels of water pollution is due to the presence of heavy metals from industrial effluents such as illegal mining, batteries, ammunition and glass ceramics, which puts at risk human health. So, heavy metals such as lead, cadmium and mercury are considered one of the most dangerous groups due to their high toxicity at low concentrations and their ability to accumulate in the organisms that ingest them. The Environmental Protection Agency (EPA) has ranked the heavy metals among the 20 most dangerous chemicals for human health and established the maximum allowed limit of lead in drinking water of 0,001 ppm.

In this recent research, an experimental design has been used to determine the adsorption of  $Pb^{2+}$  ions through the nanoclay (bentonite) intercalated with amines. The adsorption of  $Pb^{2+}$  was quantified by "Atomic Absorption", finding that the highest percentage of elimination was 96,4162% under the conditions of pH 8 and weight of the adsorbent 3,7 g. The adsorption isotherm that is best described and adjusted, was Langmuir.

## INTRODUCCION

Hoy en día la búsqueda de nuevos productos o insumos para ser utilizados como una alternativa para el tratamiento de las aguas provenientes de los residuos industriales y mineros es un reto de estos últimos tiempos. Entre muchas técnicas tales como la floculación, la precipitación, filtración, la flotación y la extracción con solventes disponibles hoy en día, la adsorción es una tecnología y herramienta que puede ser aplicada en los procesos “limpios” de remediación ambiental para recuperación de metales y descontaminación de aguas residuales contaminadas con iones de metales pesados.

El plomo es un metal altamente contaminante ya que causa daño neurológico en los seres humanos. El Perú es un país que se dedica a la explotación de minerales metálicos y por ello también son la causa principal de contaminación con residuos tóxicos producto de sus procesos hacia el medio ambiente en nuestro país.

Diversos autores rescatan la importancia de la adsorción y la utilización del uso de la bentonita natural como una alternativa viable contra la contaminación ambiental. La nanoarcilla (bentonita natural modificada) nos ayuda a reducir estos metales pesados debido a sus propiedades de adsorción, a la vez es un mineral no metálico que no es costoso. Por las razones mencionadas se propone en la presente tesis analizar la adsorción del ion plomo en soluciones acuosas utilizando como material adsorbente, la nanoarcilla (bentonita natural modificada), con el objetivo demostrar sus propiedades adsorbentes de los iones plomo y la reducción de del ion plomo.

## **I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Descripción de la realidad problemática**

Los metales pesados o metales tóxicos debido a bajas concentraciones representan un riesgo para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas. Como se menciona anteriormente estos no tienen un efecto beneficioso para el organismo, y su acumulación en el tiempo y en el cuerpo de los seres humanos puede causar serias enfermedades, como por ejemplo saturnismo o envenenamiento por mercurio. Entre los procesos comúnmente utilizados para tratar efluentes y adsorber metales pesados podemos presenciar: extracción con solventes, intercambio catiónico, flotación no convencional, carbón activado y ósmosis inversas, teniendo en cuenta que algunos de los procesos antes mencionados resultan onerosos y de difícil en su elaboración, lo cual implica grandes costos de requerimientos energéticos y operación.

El Perú es un país minero que debido a su explotación genera material particulado que en muchos casos genera contaminación de agua, aire y suelo. Para evitar la contaminación, el cual ataca directamente a la salud humana y medio ambiente, se busca diversas tecnologías alternativas para la adsorción de dicho metal, la nanoarcilla (bentonita) es un mineral disponible en el país. A nivel nacional se han realizado pocos estudios para emplear la nanoarcilla (bentonita) como adsorbente de metales pesados. Sin embargo, es importante saber que esta nanoarcilla es un mineral no metálico mucho más barato que el carbón activado. Por tanto, en la presente tesis proponemos el uso de la nanoarcilla, (bentonita), del distrito Ignacio Escudero – Sullana.

### **1.2 Formulación del problema**

#### **1.2.1 Problema general**

¿Cómo evaluar la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- i. ¿Cuáles es la masa óptima para la adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero-Sullana?
- ii. ¿Cómo verificamos el tiempo de contacto y grado de acidez en el proceso de adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana?
- iii. ¿Cuál sería el modelo isotérmico de adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas que mejor se adecue al proceso utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- i. Determinar la masa óptima para la adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana.
- ii. Determinar el tiempo de contacto y grado de acidez del proceso de adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana.
- iii. Establecer el modelo isotérmico de adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas que mejor se adecue al proceso utilizando la nanoarcilla (Bentonita).

#### **1.4 Limitantes de investigación**

Los limitantes a los que estuve expuesto en la investigación se expresa a continuación:

- i. Características de las muestras

Dentro de la población usuaria de Ignacio Escudero (Piura) existen varios puntos donde el mineral no metálico se encuentra no homogénea, se distingue por los colores, por lo que nos basamos principalmente en un

muestreo general en diferentes puntos con el objetivo de tener una muestra que nos dé mayor representatividad para nuestra investigación.

## II. MARCO TEORICO

### 2.1. Antecedentes del estudio

En el Perú, se investiga intensamente la reducción de metales pesados en el agua, entre ellos nos enfocamos en destacar los siguientes:

Meza Ramos Yoselin y Mallaupoma Muños Luis (2018) en su tesis *“Adsorción de iones de  $Cu^{+2}$  desde soluciones acuosas utilizando nanoarcillas”* se realiza un análisis profundo a las propiedades de una arcilla modificada. La nanoarcilla que se utilizó como materia prima se obtuvo de la región central de nuestro país. En esta investigación se planteó como objetivo fundamental reducir el contenido de  $Cu^{+2}$  utilizando la bentonita modificada en soluciones acuosas, controlando el grado de acidez (pH) de la operación. Los resultados que se obtuvieron en este estudio fueron óptimos debido a que el porcentaje de remoción para el  $Cu^{+2}$  fue mayor al 90%.

Arriola Marquez Mariela y Rojas Pomalima (2017) en su tesis *“Síntesis y caracterización de nanoarcillas a partir de montmorillonita utilizando sales de amonio”* determinaron que la montmorillonita como adsorbente tiene un efecto positivo, pero a la vez es determinante evaluar el efecto del pH y tiempo de contacto. En este estudio se determinó la adsorción de  $Cr^{+4}$  utilizando montmorillonita como adsorbente; para lo cual se realizó la caracterización fisicoquímica, química y mineralógica de la arcilla natural proveniente del yacimiento Doña Herminia S. A. de la localidad de Chupaca – Chongos bajo; realizándose mediante DRX (Difracción de rayos X), FTIR (espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier), FRX (Fluorescencia de rayos X), donde en el análisis se obtuvo que el área superficial del adsorbente es de 82,8818  $m^2/g$  dentro del rango de 80 – 300  $m^2/g$  para arcillas montmorilloníticas y un diámetro de poro de 5,5729 nm, perteneciente a los mesoporos debido a que su diámetro está comprendido entre 2 – 50 nm. Los niveles óptimos que se



determinaron fueron pH 8, con un porcentaje de adsorción máxima de 95,213% y una concentración final a 0,957 mg Cr<sup>+4</sup>/L.

Sun Kou Maria del Rosario (1999) es su investigación "*Modificación de arcillas naturales para su posterior uso como adsorbentes*" realizaron este estudio con el objetivo de utilizar nuevos materiales (las arcillas) que a su vez sean económicos para que posteriormente sean utilizados en la adsorción de metales pesados de los efluentes industriales. Mencionan que las arcillas minerales, bentonita, son filosilicatos laminares bidimensionales, de la familia de las esmectitas. La estructura está constituida por tetraedros de Si y octaedros de M = Al, Mg o Fe; en los que la condensación de una capa de tetraedros da una estructura 1: 1 (minerales conocidos como Kaolinita con M = Al, y serpentines con M = Mg). Una estructura 2: 1 está conformada por una capa de octaedros rodeados por dos capas tetraédricas, dentro de esta clasificación se encuentra la bentonita. Debido a estudios realizados la superficie externa de una bentonita es de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/g y que su superficie interna máxima puede llegar hasta los 900 m<sup>2</sup>/g. Estas características abren para la adsorción y catálisis nuevos campos de interés en su investigación para analizar su capacidad de adsorción. En el Perú se cuenta con reservas de estos materiales ubicados en La Libertad, Cajamarca, Moquegua, en las proximidades de Chimbote, Piura y en la zona central.

Miranda Cruz Edith y Aguirre Gomez Arturo (2002) en su investigación "*Efecto de la presencia de ligantes orgánicos y del pH en la adsorción de Cd y Pb en la bentonita*" realizaron este estudio con el objetivo de determinar el comportamiento el pH en la adsorción de Cd<sup>2+</sup> y Pb<sup>2+</sup> utilizando una suspensión de bentonita. Se estudió el método estático de adsorción a un grado de acidez de 5,5 y 6,5, controlando la fuerza iónica y electrolítica con una solución CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>-NaNO<sub>3</sub> 0,01 M. En este estudio se analizaron mediante ecuaciones de las isothermas de adsorción de Langmuir, Freundlich y Henry. Se ajustaron los tres modelos

de isothermas de adsorción con ligantes orgánicos y también sin la misma. Los resultados fueron diferentes para cada metal y para los dos valores de pH, esto también nos indica que la afinidad relativa de la arcilla por cada metal es distinta. La adsorción con ligantes orgánicos tuvo un mejor resultado en comparación de la adsorción sin los ligantes orgánicos (arcilla sola). Esta investigación también se concluyó la afinidad de la bentonita por los metales de  $Cd^{2+}$  y  $Pb^{2+}$  a dos valores de pH.

Así mismo, a nivel internacional, se están investigando múltiples estudios acerca de los procesos u operaciones para reducir el plomo en soluciones acuosas. Entre ellos podemos destacar el siguiente:

Andrade L., Covelo E. y Vega F. (2005) es su investigación "*Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales*" evaluaron la eficiencia de las arcillas especiales para determinar el porcentaje de adsorción de los metales pesados, parte de su desarrollo se determinó utilizando la bentonita magnésica (Toledo, España) las cuales las pasaron por un lecho y dieron resultados muy eficaces para disminuir la concentración de los metales pesados en aguas residuales de las industrias. IZARR – FERROL (España) es una de las compañías españolas que se dedica a este tipo de investigaciones, las cuales en las múltiples escalas de su proceso genera residuos con altos contenidos metales pesados, lo cual conlleva a eliminar o separar para evitar un impacto en el medio ambiente. Para evaluar la adsorción se dividieron las muestras en dos partes, de las cuales se filtró una muestra a través filtros Whatman 42 que atrapan o retienen las partículas de tamaño superior a 2,5 mm. Luego las sub muestras se separaron en 1 000 ml de las aguas residuales filtradas y sin filtrar. Estos últimos pasaron por 10 g de arcilla (lecho de 3 cm de espesor) las cuales tuvieron un tiempo de contacto entre el agua y la arcilla de casi 3 horas. Los análisis se realizaron con el programa varianza (ANOVA). A la vez analizo las diferencias mediante una correlación y regresión.

## **2.2. Marco Teórico científico**

### **2.2.1. Adsorción**

Es un fenómeno físico o químico que involucra la transferencia de energía (reacción exotérmica) del adsorbato (gas o líquido) a la superficie de un sólido (adsorbente). Esta operación o proceso se divide en tres etapas seguidas. Partiendo de la primera etapa el adsorbato se acerca a la superficie externa del sólido quien es el adsorbente, ocurriendo un empuje a la resistencia estando saturada en una fina película límite alrededor del adsorbente. La parte de la superficie externa que expone el sólido (adsorbente) generalmente es mucho menor al 1% del total de área de la superficie total (superficie externa e interna). Durante el proceso final el líquido o gas (adsorbato) se atrae a la superficie del sólido (adsorbente) observándose la adsorción tal cual indicar la definición (Obregón Valencia, 2012).

El análisis de Ochoa Huerta (2001) la operación de adsorción mediante la formulación de algunos modelos requiere:

- Contacto del adsorbente y la solución.
- Al efectuarse la adsorción el soluto se une preferentemente a la superficie del adsorbente respecto a otros solutos.
- Lavado de la columna con una solución que no provoque la desorción del soluto de interés.
- Finalmente se efectúa la recuperación del soluto utilizando un fluido que favorezca la desorción, elución.

También:

- El establecimiento de las relaciones de equilibrio y de la capacidad de adsorción de los sistemas.
- El establecimiento de la rapidez de la adsorción con respecto a los fenómenos difusivos y cinéticas de superficie.
- Los balances de masa y energía del sistema de adsorción específico (intermitente, continuo, serie, paralelo, etc.).
- Las condiciones iniciales y de frontera.

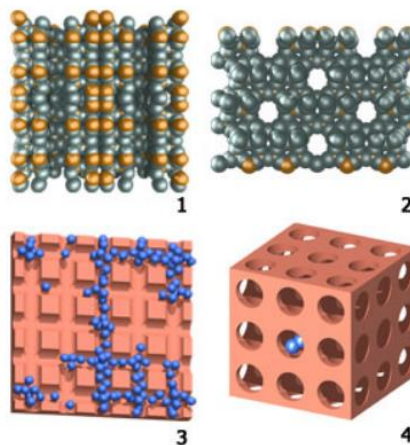
i. **Tipos de adsorción.** - Se acepta la presencia de dos tipos de adsorción fundamentales según la interacción entre las moléculas de adsorbente y adsorbato, las cuales son la fisisorción y quimisorción detallan a continuación:

➤ **Fisisorción.** - También llamado adsorción física se produce si el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de fuerzas de Van der Waals. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos, apenas unos cuantos kJ, comparables al calor de vaporización del adsorbato.

El aumento o incremento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción de estas moléculas. Adsorbentes como la zeolita, el gel de sílice, el carbón activo, la alúmina y otros metales no metálicos relacionados a la familia de los silicatos y filosilicatos tienen una estructura altamente porosa con una relación superficie/volumen del orden de cien por lo que pueden adsorber sustancias refrigerantes. Cuando se satura se puede regenerar simplemente con calentamiento para que esa cámara se libere (Fernández Pino, 2011).

**Figura N° 2.1**

MOLECULAS CON PROPIEDADES DE ADSORCION



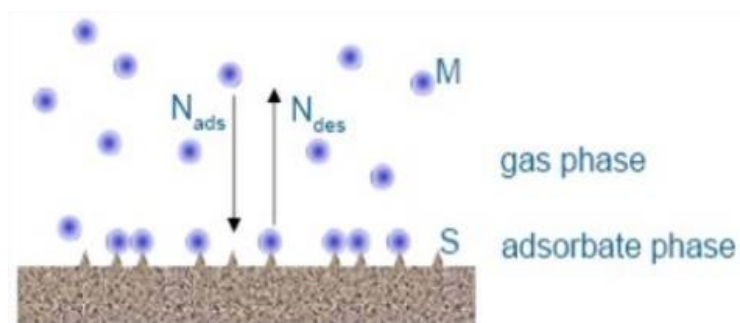
**Fuente:** (Fernández Pino, 2011)

La capa adsorbida en la adsorción física puede variar en espesor, desde una molécula a muchas moléculas, debido a que las fuerzas de Van der Waals se pueden extender desde una capa de moléculas a otras. El proceso es intermitente debido a que el adsorbente se regenera cuando se satura. Por ello, una máquina de adsorción consta de al menos dos cámaras o lechos de adsorción porque así se consigue que las cámaras inviertan el ciclo de tal modo que donde se produce la adsorción se producirá la desorción y viceversa para conseguir que no pare la producción de frío y la operación sea continua (Fernández Pino, 2011).

➤ **Quimisorción.** - Denominada también adsorción química, se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, en este caso se forman y se rompen enlaces. La adsorción química no va más allá de una monocapa en la superficie. Se caracteriza por la unión química fuerte entre el adsorbato y el adsorbente. Por lo tanto, es más difícil de revertir y requiere más energía para eliminar las moléculas adsorbidas que en la adsorción física. El producto más usado en este tipo de adsorción ha sido el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). También han sido utilizados silicatos (Fernández Pino, 2011).

**Figura N° 2.2**

**ADSORCION DE NITROGENO CON EL AIRE**



Fuente: (Fernández Pino, 2011)

La diferencia de la fisisorción con respecto a la quimisorción se aplica donde la primera tiene la fuerza de interacción adsorbato (líquido o gas)

y el adsorbente (sólido) presentan fuerzas débiles, en el segundo tipo se transforman enlaces químicos donde se relacionan el adsorbato y las localizaciones específicas de la superficie del adsorbente (Fernández Pino, 2011).

### **2.2.2. Arcilla**

Desde muchos años atrás, las arcillas, compuesto por minerales de granos muy finos, son de gran importancia para la humanidad, porque forman parte del suelo y son originadas por los minerales primarios producto de un proceso de meteorización y otros procesos. La arcilla al ser sometida a presión tiene mayor grado plasticidad y gran capacidad para endurecerse al ser secada.

Cabe recalcar que las arcillas están distribuidas considerablemente en zonas erosionadas, depósitos geológicos y sedimentos marinos. Debido a la abundancia y a las propiedades fisicoquímicas que contienen son utilizadas en las diferentes industrias y como materiales adsorbentes de contaminantes (Aauto Ureta, 2017).

### **2.2.3. Bentonita**

La bentonita es un mineral no metálico natural con la más amplia variedad es usos industriales y a la vez por sus características para obtener un incremento en valor económico que al modificarse física o químicamente puede lograr en diversos motivos incrementos en valores económicos muy por encima de otros minerales (Dirección General de Desarrollo Minero, 2014).

**Figura N° 2.3**

**BENTONITA NATURAL**



Fuente: INSUMEX S.A

### **i. Tipos de bentonitas**

➤ **Bentonitas cálcicas.** - Son arcillas que se decoloran naturalmente, tiene una característica de permutabilidad al ion calcio, están también son llamadas sub – bentonitas. Se apartan al sumergirse en soluciones acuosas, las cuales tienen menor propiedad para absorberla mostrando una reducción en su área superficial (Arriola M. y Rojas P., 2017).

➤ **Bentonitas sódicas.** - Las bentonitas sódicas conocidas como bentonitas hinchables se caracterizan por su peculiar afinidad con el agua y su amplia capacidad de hinchamiento en su estructura, teniendo en cuenta que su volumen puede incrementarse hasta quince veces más y su peso podría aumentar hasta cinco veces más. En ellas es variable el ion de sodio (Arriola M. y Rojas P., 2017).

### **ii. Aplicaciones industriales de la bentonita**

Esta arcilla es empleada en la industria petrolera para la fabricación de lodos de perforación; también se usa en la elaboración de moldes para fundición, como agente aglutinante en la producción de pellets de hierro, en la clarificación de vinos y jugos; así como material de sellado de residuos tóxicos, peligrosos y radioactivos. (Dirección General de Desarrollo Minero, 2014).

### **iii. Composición química de la bentonita**

Los análisis químicos y mineralógicos fueron analizados en la empresa INSUMEX S.A estos nos determinan que las bentonitas son del tipo Filosilicatos. A continuación de muestra los compuestos que se determinaron según los siguientes estudios.

**Tabla N° 2.1**

#### **CONSTITUYENTES DE LA BENTONITA**

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
47,9-	20,0-	0,2-	2,1-	1,0-	0,2-	0,3-	17,1-
51,2	27,1	1,4	6,6	3,7	0,6	0,8	23,7

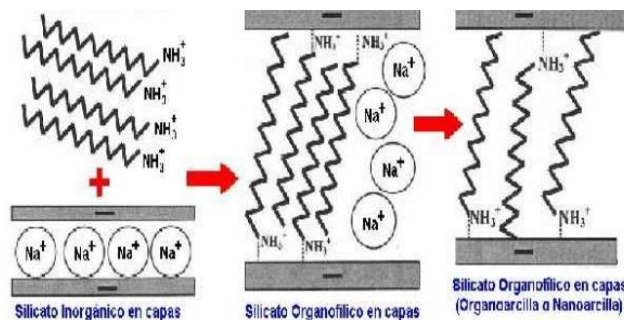
Fuente: Análisis químicos y mineralógicos INSUMEX S.A

### 2.2.4. Nanoarcilla

Las nanoarcillas, también identificado científicamente como organoarcillas, son arcillas transformadas por medio de la manipulación revisada a nivel nanométrico con un diseño determinado de su estructura para cada utilización. Asimismo, éstas permiten que las películas poliméricas tengan mayor grado de impenetrabilidad al flujo de vapor de agua y otros gases. Gracias al intercambio catiónico, ciertos iones inorgánicos tales como el  $\text{Ca}^{+2}$  y otros, han sido sustituidos por cationes orgánicos, lo cual implica un aumento entre las capas de silicato impulsado por la penetración de cadenas poliméricas (Arriola M. y Rojas P., 2017).

**Figura N° 2.4**

#### INTERCAMBIO DE CATIÓN INORGANICO Y ORGANICO

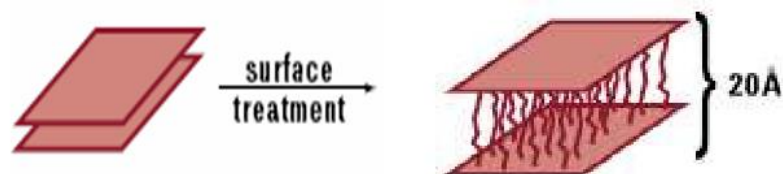


Fuente: (Arriola, M y Rojas, P., 2017)

A la vez, dicho intercambio catiónico reduce la atracción de las partículas de la montmorillonita, obteniendo la expansión de la distancia entre capas hasta de 20 Å (Arriola M. y Rojas P., 2017).

**Figura N° 2.5**

#### ETAPA DE MONTMORILLONITA HASTA NANOARCILLA



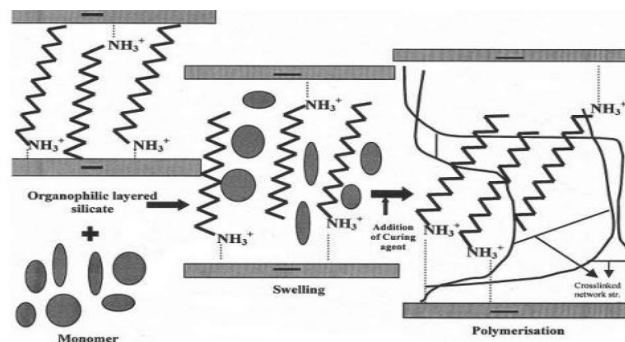
Fuente: (Arriola, M y Rojas, P., 2017)



Las nanoarcillas también llamado organoarcillas (arcillas modificadas) tienen propiedades importantes como la hibridación las cuales hacen concordantes con materiales químicos orgánicos y los vuelven opuestos a las soluciones acuosas, reduciendo la absorción de la solución acuosa de 700% a un 7% de su peso. Con esta separación de los componentes o láminas de las nanoarcillas pueden lograr distanciarse mucho más absorbiendo monómeros (Arriola M. y Rojas P., 2017).

**Figura N° 2.6**

**DISTANCIA ENTRE CAPAS CON MONÓMEROS**

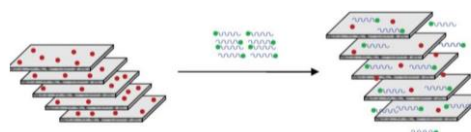


Fuente: (Arriola, M y Rojas, P., 2017)

Los cambios físicos y químicos de las arcillas laminares con los agentes hidrofóbicos son importantes ya que gracias a ello se obtiene un mayor grado de compatibilidad con los polímeros. A su vez, la modificación superficial implica reemplazar los cationes calcio y sodio del espacio interlaminares por un alquilamonio, el cual generalmente es una sal amonio (Arriola M. y Rojas P., 2017).

**Figura N° 2.7**

**MODIFICACIÓN POR CATIONES ORGANICOS**



Fuente: (Arriola M. y Rojas P., 2017)

### 2.2.5. Metales pesados

Son también llamados metales tóxicos los cuales tiene propiedades de elevada densidad y propiedades de adherirse al cuerpo humano. Generalmente son contaminantes para el ecosistema y los seres humano; entre los más fuertes de penetrarse en soluciones acuosas destacamos cadmio, arsénico, cromo, plomo, níquel y mercurio (Moncada y Pomiano, 2018).

**Tabla N° 2.2**

DIVISION DE PELIGROSIDAD DE LOS METALES

<b>PRIORIDAD</b>	<b>RIESGO AMBIENTAL</b>
ALTA	Pb, Cr, Cd, Hg
MEDIA	Co, Cu, Ni
BAJA	Fe, Al

Fuente: (Moncada y Pomiano, 2018)

### 2.2.6. Generalidades del Plomo

El plomo es un metal gris azulado, maleable y dúctil, perteneciente al grupo IV de la tabla periódica, con un número atómico de 82; una valencia de 2,4; un peso específico de 11,44 y un punto de fusión próximo a los 327°C. El plomo es resistente al ácido sulfúrico, se disuelve en ácido nítrico y es solubilizado por los ácidos orgánicos (ácido acético, alimentos ácidos) y por el agua cuando ésta contiene nitratos y sales de amonio (Cabañas C. María, 1998).

**Tabla N° 2.3**

EL PLOMO Y SUS PROPIEDADES QUIMICAS

Elemento	Plomo
Estado de oxidación	+2,+4
Numero Atómico	82
Densidad /g/mol)	11,4
Masa atómica (g/mol)	207,19
Punto de fusión (C°)	327,4
Punto de ebullición (C°)	1725

Fuentes: (Lacasaña M., Romieu I. y Connell R., 1996)

a) Efectos ambientales del Plomo. - El plomo es un metal pesado que ha sido utilizado para la elaboración de diferentes productos como las baterías, gasolinas, tuberías, pintura, entre otros; por lo que, resulta cotidiano interactuar con estos productos derivados. Sin embargo, hace varios años se reconoce que este metal produce contaminación ambiental y afecta a la salud de las personas. Esto se hizo evidente en la Cumbre de los Presidentes de las Américas en Miami en 1994 en la que se acordó eliminar su uso en la gasolina en todo el hemisferio, ya que esta sustancia era una de las fuentes principales de exposición al plomo (Lacasaña M., Romieu I. & Connell R., 1996).

La mayor parte del plomo en el aire, se encuentra bajo la forma de partículas finas. Las formas químicas frecuentes emitidas por las diversas fuentes contaminantes son haluros, óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos de plomo; no obstante, son los sulfatos, los compuestos predominantes en el aire. Estas son liberadas a la atmósfera en forma de gases, vapores o partículas sólidas capaces de mantenerse en suspensión, llamados material particulado (PM 2,5 y PM 10), en concentraciones superiores a las normales, las más perjudiciales son las de menor diámetro y por ende mayor capacidad tendrá por penetrar al árbol respiratorio, razón por la que se le atribuye su efecto más grave sobre la salud (Price H., Arthur R. y Sexton K., 2010).

En las capas superiores del suelo se pueden encontrar estos compuestos, a excepción de los casos de su forma natural está ubicado en las capas profundas de la corteza terrestre. Su baja movilidad en suelo no permite el filtrado al subsuelo o capas subterráneas. La interacción del plomo con el suelo se hace mayor si hay presencia de materia orgánica y coloides inorgánicos. Al aumentar el pH de los suelos disminuye la interacción con este y se hace más móvil (Price H., Arthur R. y Sexton K., 2010).

b) Efectos del plomo en la salud. - El plomo puede ingresar al organismo por tres vías (Respiratoria, digestiva, Dérmica o cutánea). El

plomo inorgánico solo puede acceder por las dos primeras y no puede ser metabolizado por el organismo, mientras que el plomo orgánico puede penetrar por cualquiera. Por la piel la entrada del plomo inorgánico es mínima, pero el plomo orgánico pasa a través de los folículos pilosos, glándulas sebáceas y sudoríparas directo al torrente sanguíneo.

El plomo que se absorbe por vía respiratoria es cercano al 40% depositado en los pulmones, se encuentra en sangre circulándose alrededor de 50 horas, pasándose un porcentaje a tejidos, o es eliminado, aunque cierta cantidad de absorción puede llevarse a cabo en las vías aéreas superiores, la porción más relevante tiene lugar en las vías respiratorias inferiores, a nivel de alvéolo, a través de la circulación pulmonar. El grado de absorción de esta vía depende de la concentración ambiental, del tiempo de exposición, de la forma física de la porción de polvo o tamaño de la partícula respirable, es por lo general inferior a  $5\mu\text{m}$ , y de factores personales como la edad, la frecuencia y volumen respiratorio (Rodríguez Alexis y Cuellar Liliam, 2001).

En cuanto a la vía digestiva se refiere, cuando las partículas de polvo son ingeridas directo a través de las manos, alimentos, bebidas o cigarrillos que proviene de la contaminación ambiental, el plomo se fija en la saliva y se traga, seguido por el tracto digestivo y se debe al ingreso por la comida, bebidas o la tierra; es estimado que los niños de 2 a 3 años ingieren alrededor de 100 mg de tierra por día. Esta vía depende del estado físico y químico del metal, el tránsito gastrointestinal, la edad, estado fisiológico, estado nutricional, deficiencias de los niveles de calcio, hierro, fósforo o zinc, si existe niveles altos de grasa en la dieta, la absorción puede ser mayor, ingesta inadecuada de calorías, presencia de estómago vacío o ayuno prolongado y factores genéticos del individuo. (Rodríguez Alexis y Cuellar Liliam, 2001).

c) El plomo y sus límites máximos admisibles para su tratamiento. - La derogación de esta norma peruana que están referidas a los Estándares de Calidad Ambiental para aguas superficiales destinadas a la

producción de agua potable se muestra en el siguiente cuadro. En este cuadro (Ver tabla N° 2.4) muestra hasta qué punto puede ser tratado el plomo de acuerdo la cantidad de mg/L de plomo (Decreto supremo N° 004–2017 MINAM).

### 2.2.7. Procesos para la eliminación de metales tóxicos

Debido a los grandes problemas en el ecosistema y la salud humana que surgen a causa del aumento en la concentración de los metales pesados y a la vez como resultado de las múltiples operaciones y procesos que se generan en todos los países (países desarrollados y sub desarrollados) se viene investigado diferentes formas para encontrar soluciones y poder reducir estos metales. Existen diferentes métodos tecnológicos para la descontaminación de las soluciones acuosas con metales pesados las cuales son: tratamiento electroquímico precipitación, intercambio iónico, oxidación-reducción, filtración, y adsorción (Moncada y Pomiano, 2018).

**Tabla N° 2.4**

#### LÍMITES MÁXIMOS ADMISIBLES DE METALES

Metales	Tratamiento convencional (mg/L)	Tratamiento avanzado (mg/L)
Aluminio	0,9	5,0
Arsénico	0,01	0,01
Cadmio	0,003	0,005
Cobre	2,0	2,0
Cromo	0,05	0,05
Mercurio	0,001	0,002
Molibdeno	0,07	**
Plomo	0,01	0,05
Zinc	3,0	5,0

**Fuente:** Decreto supremo N° 004 – 2017 MINAM.

**Tabla N° 2.5**

**MÉTODOS TRADICIONES PARA EL TRATAR EL AGUA**

METODO	DESCRIPCIÓN
Adsorción	El objetivo de este método es deshacerse de forma unitaria a los componentes de una sustancia líquida gaseosa
Tecnologías de membranas	Este método interfiere un proceso similar a un filtro el cual tiene como finalidad separar el agua y los sólidos (metales pesados)
Filtración	El objetivo de este método mecánico y físico es separar las sustancias que se encuentran en distintos estados (sólido, líquido y gas)
Precipitación	Tiene como objetivo separar el sólido de un líquido, debido a la consecuencia de una solución de compuestos insolubles de los elementos que no se requiere (metales pesados) que están dentro de una solución contaminada

**Fuente:** (Moncada y Pomiano, 2018)

**2.2.8. Consecuencia de las variables de la adsorción**

La adsorción es un fenómeno físico químico entre iones metálicos cargados de forma positiva o negativa. Existe ciertas condiciones experimentales, las cuales interfieren en el proceso de adsorción los cuales son el grado de acidez, el tiempo de contacto y la concentración (Meza Ramos y Mallaupoma Muños, 2018).

- a) Influencia del grado acidez (pH). - Los metales en sustancias químicas solubles disueltas en agua se encuentran en forma de diferentes especies en función del grado de acidez de la solución, la cual tiene como resultado la gran dependencia con la posibilidad de extracción del metal. Teniendo en cuenta que en cada especie química los mecanismos de adsorción siempre son aleatorios. Considerando otras teorías los metales pesados son elementos electropositivos debido a que comparten iones positivos (catión) a la superficie del sólido (adsorbente).

Debido a estos resultados va en aumento la cantidad de cargas positivas con el objetivo de lograr la adsorción y el porcentaje de remoción de los iones metálicos aumenta cuando se eleva el grado de acidez a 8 y debido a esto el pH óptimo es el que tiene la capacidad de adsorber la capacidad máxima del ion metálico, en un determinado tiempo y lugar, el cual se vuelve más flexible en soluciones básicas. Debido a que el grado de acidez aumenta considerablemente del valor óptimo, la eficacia de la biomasa crece (Meza Ramos y Mallaupoma Muños, 2018).

- b) Concentración del metal. - El grado de capacidad de adsorción de un material adsorbente determina su efectividad. Al ponerse en contacto con concentraciones diferentes del metal, los materiales establecen distintos equilibrios de extracción, los cuales dependen de las condiciones experimentales y son distintas para cada temperatura, llamándolos equilibrios isotérmicos. Es muy importante que los modelos teóricos que se aplican para describir los resultados experimentales deben ser idóneos para predecir los procesos de adsorción a bajas y altas concentraciones y a su vez debe de tener la facultad de interpretación física del mecanismo de adsorción. (Meza Ramos y Mallaupoma Muños, 2018).

#### **2.2.9. Cinética de adsorción**

Los factores físicos y químicos se afectan por los distintos procesos de adsorción. Cabe recalcar que en los factores de interés se halla el efecto del grado de acidez (Anaya, 2007).

Dentro de los modelos cinéticos más influyentes se encuentran:

- a) Ecuación de Elovich
- b) Ecuación de Lagergren
- c) Ecuación de pseudo – segundo orden

### 2.2.10. Isotermas de Adsorción

Podemos definir la isoterma de adsorción como la relación analítica que correlaciona la cantidad de un singular componente adsorbido en una interface con la concentración de éste en el seno de la fase.

- a) Isoterma de Langmuir. - Ésta isoterma define de manera cuantitativa el depósito de una enorme capa de moléculas sobre una superficie adsorbente como una función de la concentración del material adsorbido en el líquido con el que se pone en contacto. Asume que la máxima adsorción pertenece a una monocapa saturada de moléculas de adsorbato, que las moléculas se adsorben en espacios determinados en la superficie y que la energía de adsorción es constante. Se demuestra en la siguiente ecuación generalizada: (Moncada Azabache y Pomiano Bocanegra, 2018).

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} b C_e}{1 + b \cdot C_e}$$

La Ecuación identificada como isoterma de Langmuir y en la cual se ajustan datos experimentales de distintos sistemas.

Donde:

$q_{max}$  : Es la máxima cantidad del catión metálico por unidad de peso de biomasa para agrupar una monocapa completa en la superficie (mg/g)

$C_e$  : Es la concentración del metal remanente en la solución

$b$  : Es una constante que tiene relación con la afinidad de los sitios de unión con los cationes metálicos.

- b) Isoterma de Freundlich. - También denominada ecuación de Freundlich, consiste en una curva que une la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente con la del soluto en el líquido



con el que se encuentra en contacto. (Moncada Azabache y Pomiano Bocanegra, 2018).

La ecuación empírica más empleada es la isoterma de Freundlich, como se expresa en la ecuación:

$$q_e = kfC_t^{1/n}$$

Donde:

- $K_f$  : Indica la capacidad de adsorción
- $C_t$  : Indica concentración del metal remanente en la solución.
- $n$  : Es el indicador del efecto de la concentración en la capacidad de adsorción y simboliza la intensidad de adsorción.

### 2.3. Definiciones de términos básicos

- a) Grado de acidez. - El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones.
- b) Concentración. - En química, la concentración de una solución es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolución o de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el disolvente es la sustancia que disuelve al soluto, y la disolución es el resultado de la mezcla homogénea de las dos anteriores. A menor proporción de soluto disuelto en el solvente, menos concentrada está la solución, y a mayor proporción más concentrada está. Una disolución (solución) es una mezcla homogénea, a nivel molecular, de dos o más sustancias.
- c) Ion. - Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Conceptualmente

esto se puede entender un átomo o molécula, se han ganado o perdido electrones; este fenómeno se conoce como ionización.

- d) Metales pesados. - Se aplica a cualquier elemento metálico que tenga una densidad relativamente alta y que sea tóxico o venenoso, aun en bajas concentraciones.

### III. VARIABLES E HIPÓTESIS

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

El empleo de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero hace posible la adsorción del  $Pb^{2+}$  presentes en soluciones acuosas.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

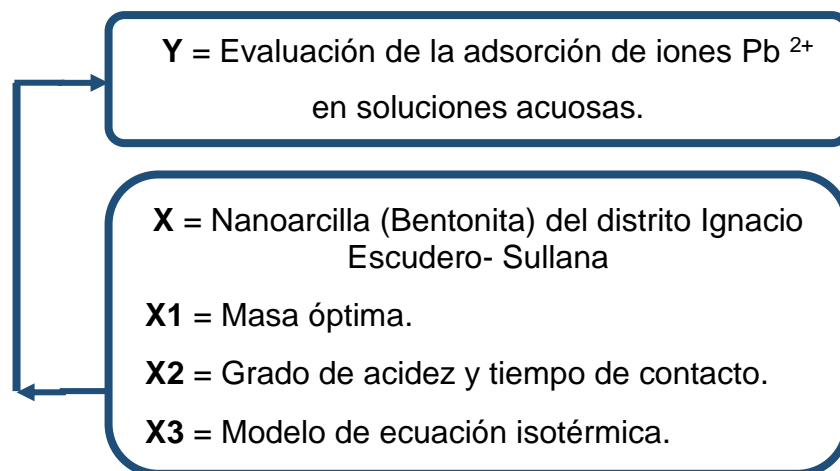
- i. La masa óptima de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero – Sullana permite obtener un adsorbente adecuado en la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas.
- ii. El tiempo de contacto y grado de acidez influyen en la adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero – Sullana.
- iii. La isoterma que mejor se adecua al proceso de la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana es la de Langmuir.

#### 3.2. Operacionalización de variables

La presente investigación posee las siguientes variables, esquematizadas en la Figura N° 3.1 (Ver pag. N° 31).

**Figura N° 3.1**

#### DEFINICION DE VARIABLES



Fuente: Elaboración propia

En esta investigación se desarrolló la operacionalización de las variables mediante los pasos generales obtenidos de la matriz de consistencia que se desarrolló en el proyecto de investigación dimensiones, los indicadores y los métodos de ensayo que se desarrollaron en este estudio, donde X es la variable independiente y la Y es la variable dependiente.

**Tabla N° 3.1**  
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Métodos
Y = Evaluación de la adsorción de iones $Pb^{2+}$ en soluciones acuosas.	– Remoción de $Pb^{2+}$	– Porcentaje	– Absorción atómica.
Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	Métodos
X1 = Masa óptima	– Peso	– gramos	– Balanza digital.
X2 = Grado de acidez y tiempo de contacto.	– Grado de acidez	– pH	– Potenciómetro.
X3 = Modelo de ecuación isotérmica.	– Tiempo de contacto	– Minutos	– Cronometro.
	– Modelo de ecuación isotérmica	– mg/g	– Ecuación matemática

Fuente: Elaboración Propia

## **IV. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Tipo y diseño de investigación.**

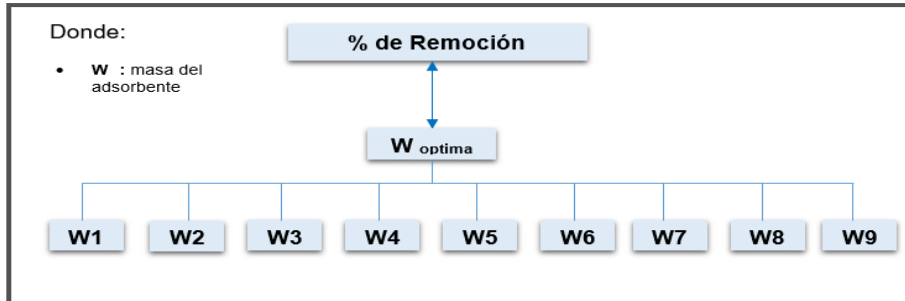
- a) Tipo de investigación. - El objetivo de esta tesis fue de tipo aplicada, debido a que los efectos que se obtendrán de la experimentación se aplicarán a la sociedad y al sector productivo como base de información para disminuir el ion  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas mediante el uso de este mineral no metálico (nanoarcilla).

Este estudio realizado fue a la vez de tipo experimental, debido a que requiere del registro, análisis, observación y un adecuado control de variables específicas, a su vez fue de tipo cuantitativo ya que se realizó un análisis químico por absorción atómica en el cual se obtuvo el porcentaje de remoción del  $Pb^{2+}$  y la Isoterma de Adsorción.

- b) Diseño de investigación. - Como primera fase de la experimentación se obtuvo la masa óptima el cual se trabajó con nueve datos de referencia según investigaciones realizadas en la parte del marco teórico. Estas soluciones se mandaron analizar en el laboratorio de la empresa Impala Terminals Perú SAC.

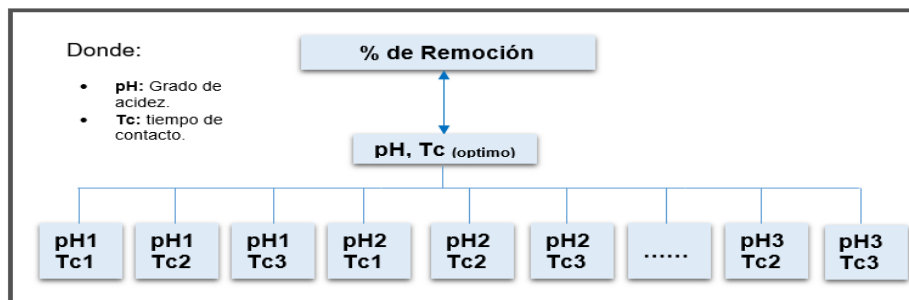
En la segunda fase de la experimentación se obtendrá el grado de acidez y el tiempo de contacto, el cual se trabajó con un diseño factorial de  $3^3$ . A la vez para determinar el modelo isotérmico y sus variables que se ajuste eficientemente a esta investigación utilizando los mejores parámetros idóneos (pH, tiempo de contacto y peso del adsorbente), los cuales han sido obtenidos de los experimentos realizados en esta investigación (Ver figura N° 4.1, 4.2, 4.3).

**Figura N° 4.1**  
DISEÑO PARA DETERMINAR LA MASA ÓPTIMA



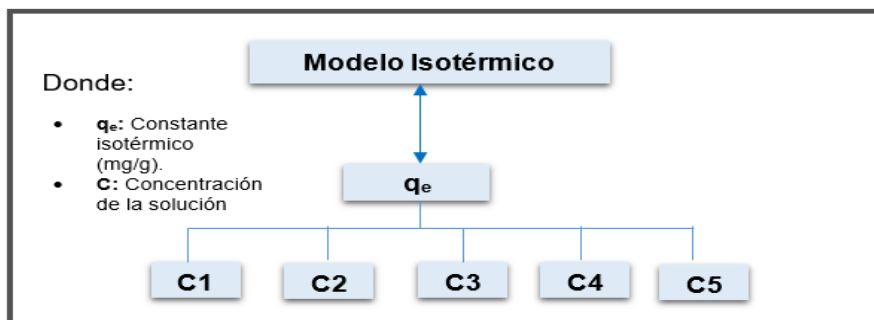
Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 4.2**  
DISEÑO PARA EVALUAR EL pH Y TIEMPO DE CONTACTO



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 4.3**  
DISEÑO PARA DETERMINAR EL MODELO ISOTERMICO



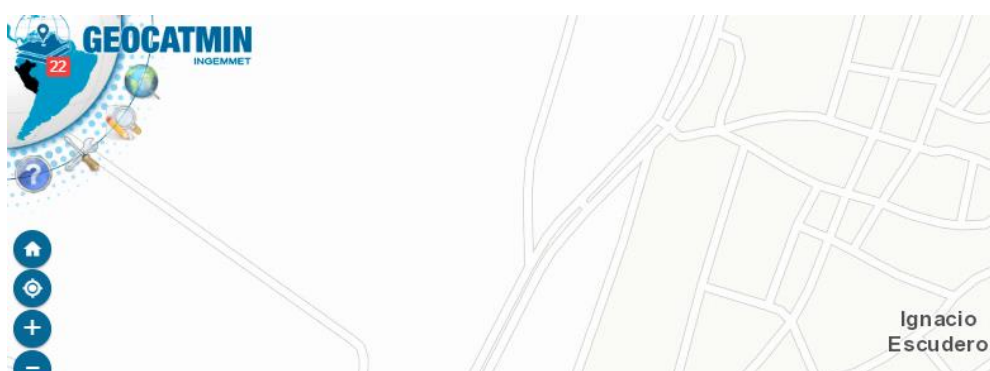
Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Población y muestra

- a) La población. - Es la bentonita proveniente de la Ignacio Escudero.
- b) La muestra. - El tamaño de la muestra extraída fue tres kilos de bentonita previamente seleccionadas según procedimiento de recolección.

**Figura N°4.4**

IMAGEN SATELITAL DE IGNACIO ESCUDERO – SULLANA



Fuente: [geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/](http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/)

## 4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- a) Área de ejecución donde se realizó la investigación. - Los análisis y la operación que se realizaron a la bentonita natural se realizó en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Callao (Laboratorio de Investigación y Laboratorio de Fisicoquímica) De igual manera, los resultados de adsorción se ejecutaron los laboratorios de la empresa Impala Terminals Perú.
- b) Materiales, reactivos y equipos. - En el siguiente cuadro mostramos las materias primas, materiales y reactivos que utilizaremos en los análisis (Ver Tabla N° 4.1).

**Tabla N° 4.1**  
MATERIA PRIMA, INSUMOS Y REACTIVOS

Materia prima e insumos
Bentonita natural
Materiales
Papel filtro
Bandeja de aluminio
Envases de plástico 100 y 1000 ml
Picetas 500 ml
Bombillas
Vaso de precipitado 100 ml
Fiola 1000 ml
Pipetas
Baguetas
Espátulas
Termómetro
Reactivos
Bromuro de hexadeciltrimetilamonio CTAB
Ácido clorhídrico (1M y 0,1M)
Hidróxido de sodio (1M y 0,1M)
Agua desionizada
Equipos
Horno eléctrico industrial
Balanza electrónica
Peachimetro digital
Estufa (secado a 90°)
Agitador magnético (magnetos)
Equipo para filtración al vacío

Fuente: Elaboración propia

- c) Procedimiento de recolección de datos. - Estos procedimientos se muestran a continuación:
- i. Elaboración del adsorbente (nanoarcilla). - La bentonita fue paso a diferentes fases (física, química) y a las etapas. Estas serán expresadas en el siguiente orden:
    - Modificación Física. - Selección: En esta parte se pesó 200 g de bentonita, las cuales fueron divididas 50 g y se completó con



agua desionizada hasta 1 L con el agitador magnético se mezcló por 5 h hasta su homogenización completa.

**Figura N° 4.5**  
MATERIA PRIMA



Fuente: Laboratorio de Fisicoquímica FIQ – UNAC

**Figura N° 4.6**  
HUMECTACION DE LA BENTONITA NATURAL



Fuente: Laboratorio de Fisicoquímica FIQ – UNAC

**Figura N° 4.7**  
MEZCLA DE LA BENTONITA NATURAL



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica FIQ – UNAC

- **Modificación Química.** - Se tomaron las muestras humectadas y homogenizadas y se añadieron 30 g de Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) para su modificación química por un tiempo de 3 h y luego incrementar la temperatura a 90°C por tiempo de 3 h.

**Figura N° 4.8**  
BROMURO DE HEXADECILTRIMETILAMONIO



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica FIQ – UNAC

**Figura N° 4.9**

**PROCESO DE LA BENTONITA NATURAL MODIFICADA**



Fuente: Laboratorio de Investigación UNAC

- Filtración al vacío. - Luego de hacer pasado por el proceso de la reacción de la bentonita natural y Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) a una temperatura de 90°C procedemos a enfriarlo, decantarlo y destilación usando el equipo de filtración al vacío.

**Figura N° 4.10**

**NANOARCILLA MODIFICADA**



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC

**Figura N° 4.11**  
FILTRACION AL VACIO



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC

**Figura N° 4.12**  
OBTENCION POR FILTRACION AL VACIO



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC

**Figura N° 4.13**  
PROCESO DE LA FILTRACION AL VACIO



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC

- Secado. - Una vez filtrado empezó el secado de la nanoarcilla utilizando un horno de laboratorio hasta incrementar progresivamente hasta una temperatura de 100°C alrededor de 24 horas y de esta manera lograr eliminar la humedad. Se obtuvo 250 g de bentonita modificada. Se pulveriza y se obtiene la nanoarcilla modificada.
- ii. Preparación de la solución del metal. - La solución acuosa se adquirió de la empresa Logística Química E.I.R.L. La concentración fue de 1 000 mg/L de iones plomo, los cuales fueron convertidos a 50 mg/L.

#### **4.4. Análisis y procesamiento de datos**

- a) Procedimiento para la determinación de la masa óptima. - Para la determinación de la masa óptima se realizaron 09 matraces de 250 ml con diferentes masas de la nanoarcilla que se obtuvo anteriormente. Se pesaron muestras (Ver tabla N° 4.2).

**Figura N° 4.14**

**PROCESO DE SECADO DE LA NANOARCILLA**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica FIQ – UNAC

**Figura N° 4.15**

**PROCESO DE SECADO Y PULVERIZADO**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica FIQ – UNAC

Se instaló cada matraz (vasija) en el agitador magnético y posteriormente se derivó en agitar durante 2,5 h a 500 rpm, controlando el grado de acidez (pH) en 5. Seguidamente se centrifugo a 3 500 rpm por un tiempo de 10 minutos. Ejecutadas estos procesos, las soluciones se analizaron por espectroscopia de absorción atómica (EEA) con la finalidad

de determinar la concentración final de  $Pb^{2+}$  Estos resultados se detallan en la Tabla N° 4.2.

**Tabla N° 4.2**  
VARIABLES PARA LA MASA ÓPTIMA

N°	pH	Peso del adsorbente (g)	C <sub>INICIAL</sub> Pb (ppm)
1	5	0,5	50
2	5	1,0	50
3	5	1,5	50
4	5	2,0	50
5	5	2,5	50
6	5	3,0	50
7	5	3,5	50
8	5	4,0	50
9	5	4,5	50

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 4.16**  
PROCESO DE LA NANOARCILLA A DIFERENTES PESOS



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC

**Figura N° 4.17**  
PROCESO DE CENTRIFUGACION



Fuente: Laboratorio de Análisis cualitativo FIQ – UNAC

- b) Procedimiento para determinar el grado de acidez y tiempo de contacto. - Para la determinación de los resultados del grado de acidez (pH) y el tiempo de contacto se empleó en 50 ml  $Pb^{2+}$  (50 mg/L) de solución acuosa en 27 matraces (vasijas) de 250 mL identificados como corresponde (Ver tabla N° 4.3).

**Tabla N°4.3**

VARIABLES PARA EL pH Y TIEMPO DE CONTACTO

N°	pH	Masa optima	Tiempo de contacto
1	4	3,3	30
2	4	3,3	60
3	4	3,3	90
4	4	3,5	30
5	4	3,5	60
6	4	3,5	90
7	4	3,7	30
8	4	3,7	60
9	4	3,7	90
10	6	3,3	30
11	6	3,3	60
12	6	3,3	90
13	6	3,5	30
14	6	3,5	60
15	6	3,5	90
16	6	3,7	30
17	6	3,7	60
18	6	3,7	90
19	8	3,3	30
20	8	3,3	60
21	8	3,3	90
22	8	3,5	30
23	8	3,5	60
24	8	3,5	90
25	8	3,7	30
26	8	3,7	60
27	8	3,7	90

Fuente : Elaboración propia

Luego la masa óptima de nanoarcilla determinada anteriormente a temperatura ambiente (25°C), estandarizándola a una velocidad de agitación de 500 rpm a tres horizontes o niveles de tiempo de



contacto los cuales fueron 30, 60 y 90 minutos y el grado de acidez (pH) de 4, 6 y 8. El pH fue estandarizado con soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 1,0 y 0,1 M e hidróxido de sodio (NaOH) 1,0 y 0,1 M. Concluido el tiempo de contactos definidos, las muestras se agitaron por 08 minutos a una velocidad de 3500 rpm, con la finalidad de separar las fases de la parte líquida del adsorbente. La solución (parte sobrenadante) los cuales fueron analizadas por Absorción Atómica con el objetivo de obtener la concentración final del  $Pb^{2+}$ , y con estos datos poder obtener los resultados del porcentaje de adsorción.

- c) Procedimiento para determinar el modelo y la isoterma de ecuación. - Para la determinación de la isoterma se utilizaron muestras con pesos, grado de acidez y tiempos de contacto óptimos en una solución de 50 ml de estándar de  $Pb^{2+}$  (ver Tabla N° 4.4).

**Tabla N° 4.4**

VARIABLES DEL MODELO ISOTERMICO

N°	Masa óptima	C <sub>INICIAL Pb</sub> (ppm)
1	3,5	10
2	3,5	20
3	3,5	30
4	3,5	40
5	3,5	50

Fuente: Elaboración propia

La medida o la cantidad de iones  $Pb^{2+}$  adsorbidos por nanoarcilla ( $q_e$ ) en unidades de mg/g fue determinada a través del siguiente cálculo matemático:

$$\frac{([C_i] - [C_f]) * V}{[W_b]} \quad (\text{mg/g})$$

Donde:

- V : Volumen tomado (L)  
 W<sub>b</sub> : Masa del adsorbente seco (g)  
 C<sub>i/f</sub> : Concentración inicial/ final (mg/L)

Posteriormente agitando y utilizando la centrifugadora a una velocidad de agitación de 500 rpm. Los niveles (fases) se dividieron por centrifugación y la proporción de iones  $Pb^{2+}$  sobrante en la fase líquida se obtuvo mediante un análisis por absorción atómica.

- d) Procesamiento estadístico y análisis de datos. - En esta reciente investigación se ha dado valor a los métodos cuantitativos, la recolección de datos se da a través de los análisis investigados, los cuales a futuro serán determinados de manera analítica y mediante cálculos matemáticos utilizando el Excel y para realizar estudios estadísticos se utilizará un software especializado como el Minitab, el cual nos determinará el diagrama de Pareto, el histograma y la significancia.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

- a) Extracción y selección de bentonita. - La bentonita que fue extraída del distrito de Ignacio Escudero, los cuales tuvieron las siguientes características.
- Color blanco uniforme
  - Libre de presencia de arcilla, tierra, arena

Para conocer sus componentes se llevó a un análisis químico por difracción de rayos X, cuyos resultados fueron los siguientes:

**Tabla N° 5.1**

CUADRO DE COMPONENTES DE LA BENTONITA

Descripción	Unidad	Mínimo	Máximo
Dióxido de Silicio – SiO <sub>2</sub>	%	60,00	---
Oxido de Aluminio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	---	16,00
Óxido de Hierro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	---	3,00
Oxido de Magnesio – MgO	%	---	3,00
Oxido de Calcio – CaO	%	---	3,00

Fuente: Estudio análisis mineralógico Insumex S.A

- b) Determinación de la masa óptima. - En la Tabla N° 5.2 (ver pág. N° 48) y en la Figura N° 5.1 (ver pág. N° 48) se puede analizar que la adsorción llega una constante de equilibrio a partir del experimento numero 7 (se utilizó 3,5 g de nanoarcilla) Es esta etapa se observa un alto porcentaje de remoción equivalente al 88,08% Debido a ello que todas las pruebas de adsorción (determinación de grado de acidez, tiempo de contacto) se trabajaron como referencia de la masa de nanoarcilla. Es importante definir que se utilizó un pH constante en este caso.

Se consideró el porcentaje de adsorción del Pb<sup>2+</sup> para la determinación de la cantidad de la nanoarcilla adecuada (costo y tiempo) luego de que la solución de Pb<sup>2+</sup> a 50 mg/L intercambiara con

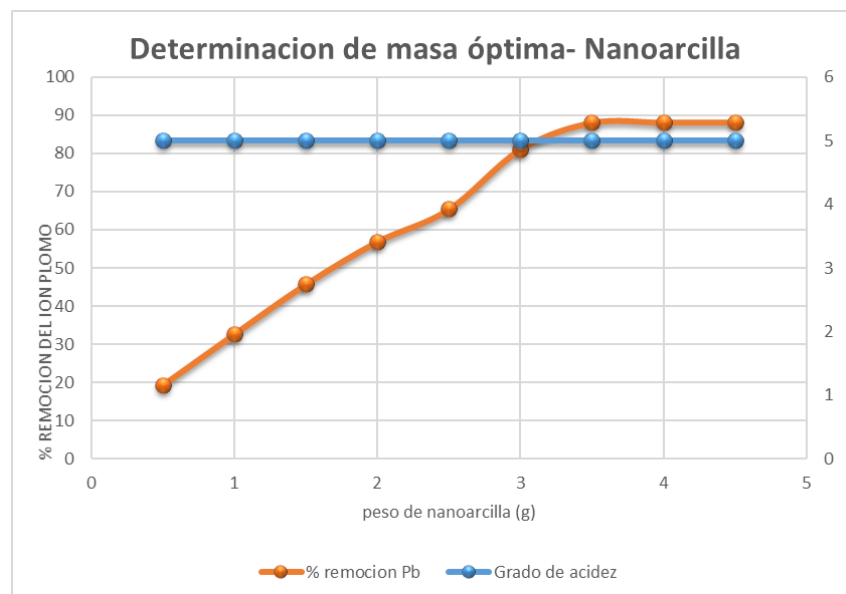
distintos pesos adsorbentes (en gramos) tal como se muestra en la Tabla N° 5.2.

**Tabla N° 5.2**  
DETERMINACION DE LA MASA ÓPTIMA

N°	pH	Peso del adsorbente (g)	C final Pb (ppm)	% remoción Pb (ppm)
1	5	0,5	40,34	19,32
2	5	1,0	33,67	32,66
3	5	1,5	27,13	45,74
4	5	2,0	21,56	56,88
5	5	2,5	17,31	65,38
6	5	3,0	9,45	81,1
<b>7</b>	<b>5</b>	<b>3,5</b>	<b>5,96</b>	<b>88,08</b>
8	5	4,0	5,93	88,14
9	5	4,5	5,93	88,14

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.1**  
CURVA DE DETERMINACION DE LA MASA ÓPTIMA



Fuente: Elaboración propia

- c) Determinación del grado de acidez y tiempo de contacto. - En la Tabla N° 5.3 (Ver pag. N° 49) se pudo determinar las variables finales del  $Pb^{2+}$  en las soluciones acuosas donde se observa la evolución y el comportamiento utilizando diferentes masa, pH y tiempo de contacto.

**Tabla N° 5.3**

**RESULTADOS DE LAS VARIABLES ESPECÍFICAS**

N°	pH	masa optima (g)	tiempo (min)	Conc. Pb (ppm)	% remoción Pb
1	4	3,3	30	33,2463	33,5074
2	4	3,3	60	26,7214	46,5572
3	4	3,3	90	24,9691	50,0618
4	4	3,5	30	28,1005	43,799
5	4	3,5	60	25,5442	48,9116
6	4	3,5	90	23,2351	53,5298
7	4	3,7	30	27,6152	44,7696
8	4	3,7	60	24,4267	51,1466
9	4	3,7	90	21,1018	57,7964
10	6	3,3	30	9,1111	81,7778
11	6	3,3	60	8,2277	82,2976
12	6	3,3	90	8,8512	83,5446
13	6	3,5	30	6,5659	86,8682
14	6	3,5	60	6,2384	87,5232
15	6	3,5	90	5,0958	89,8084
16	6	3,7	30	4,2232	91,3376
17	6	3,7	60	4,3312	91,5536
18	6	3,7	90	3,1872	93,6256
19	8	3,3	30	2,8694	94,2612
20	8	3,3	60	2,4681	95,0638
21	8	3,3	90	2,3898	95,2204
22	8	3,5	30	1,7658	96,4684
23	8	3,5	60	1,7297	96,5406
24	8	3,5	90	1,7049	96,5902
<b>25</b>	<b>8</b>	<b>3,7</b>	<b>30</b>	<b>1,7919</b>	<b>96,4162</b>
26	8	3,7	60	1,7175	96,565
27	8	3,7	90	1,7038	96,5924

Fuente: Lectura realiza por absorción atómica- Impala Terminals Perú SAC.

Por lo tanto, el mayor porcentaje que se obtuvo en la remoción de  $Pb^{2+}$  fue equivalente a 94,4162% (experimento número 25), el cual se

realizó en un tiempo de contacto 30 minutos, grado de acidez equivalente a 8 y obteniéndose como resultado final una concentración de 1,7919 mg Pb<sup>2+</sup>/L con lo cual nos demuestra gran capacidad de adsorción.

- d) Curva de análisis a masa óptima, tiempo de contacto y grado de acidez. - Los resultados de análisis por absorción atómica muestran claramente cómo evoluciona la capacidad de adsorción de plomo a través de diferentes tiempos de contacto y pH. En la Tabla N° 5.3 (Ver pág. N° 49) se puede mostrar que a un mayor pH la capacidad de adsorción es mayor. (Ver Tabla N° 5.4, 5.5 y 5.6 pág. N° 50 y 5.5 pág. N° 51).

**Tabla N° 5.4**

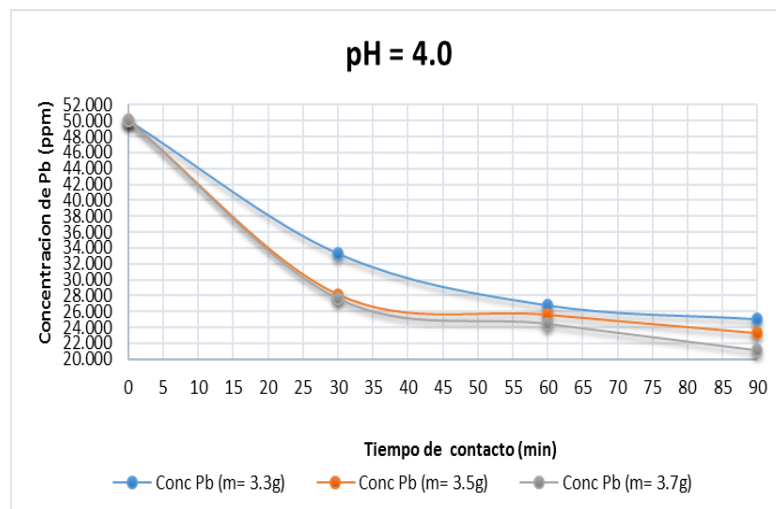
RESULTADOS DE ANALISIS pH = 4

CURVA DE ANALISIS DE Conc. Pb (ppm) pH = 4			
Masa	3,3	3,5	3,7
T (min)	Conc. (ppm)	Conc.(ppm)	Conc.(ppm)
30	33,2463	28,1005	27,6152
60	26,7214	25,5442	24,4267
90	24,9691	23,2351	21,1018

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.2**

CURVA DE ANALISIS pH = 4



Fuente: Gráfico utilizando los datos de la tabla 5.4

**Tabla N° 5.5**

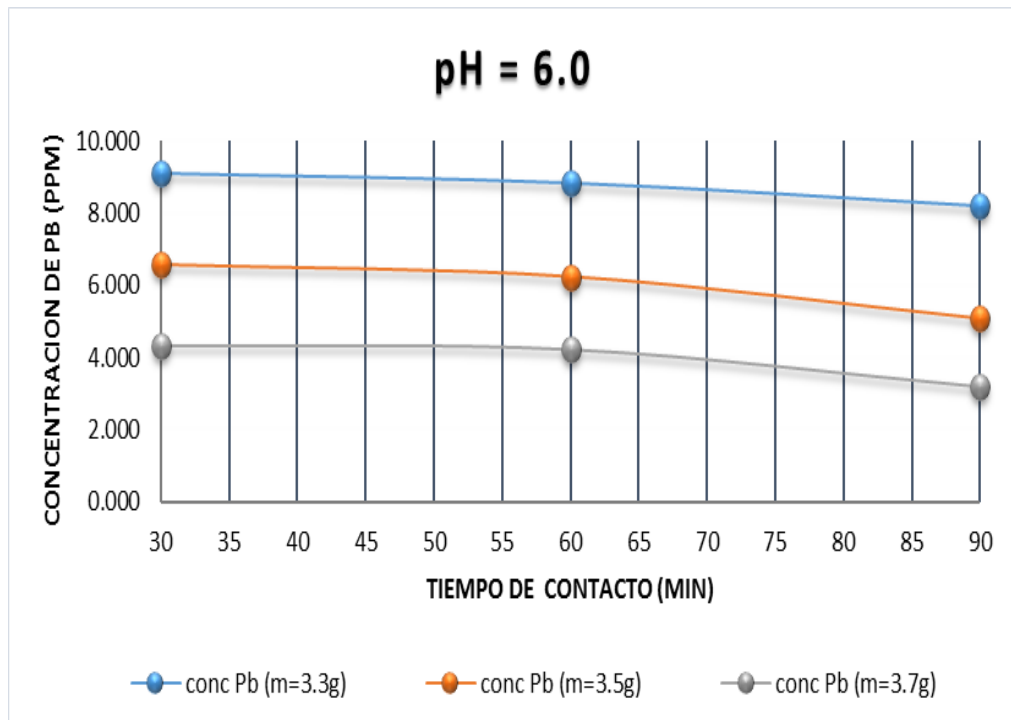
RESULTADOS DE ANALISIS pH = 6

CURVA DE ANALISIS DE Conc. Pb (ppm) pH = 6			
Masa	3,3	3,5	3,7
T (min)	Conc.(ppm)	Conc.(ppm)	Conc.(ppm)
30	9,1111	6,5659	4,3312
60	8,8512	6,2384	4,2232
90	8,2277	5,0958	3,1872

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.3**

CURVA DE ANALISIS pH = 6



Fuente: Gráfico utilizando los datos de la tabla 5.5.

**Tabla N° 5.6**

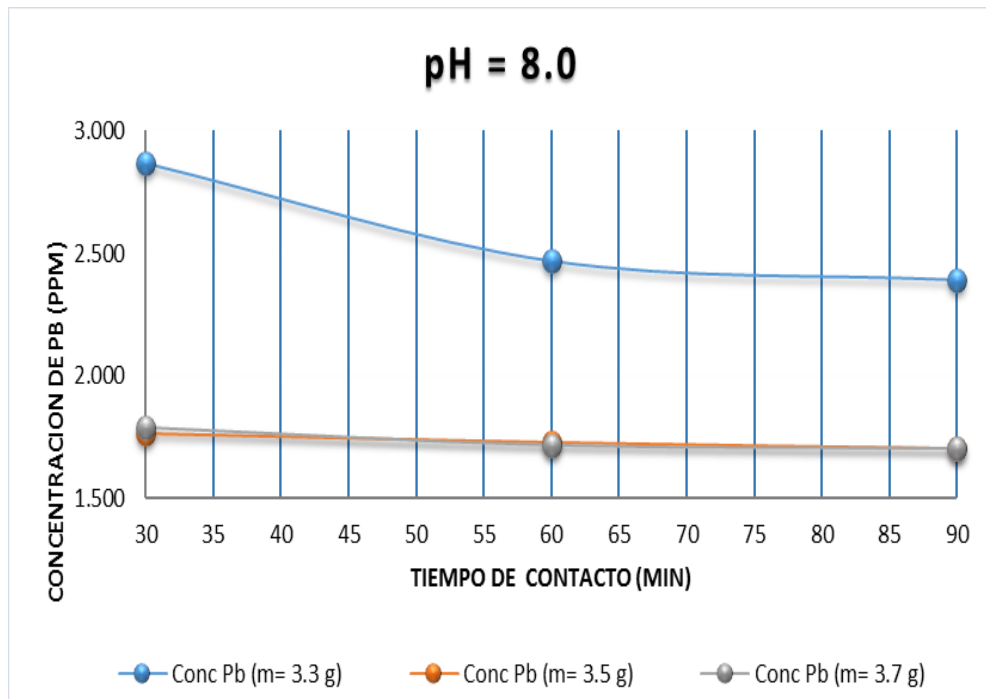
RESULTADOS DE ANALISIS pH = 8

CURVA DE ANALISIS DE Conc. Pb (ppm) pH = 8			
Masa	3,3	3,5	3,7
T (min)	Conc.(ppm)	Conc.(ppm)	Conc.(ppm)
30	2,8694	1,7658	1,7919
60	2,4681	1,7297	1,7175
90	2,3898	1,7049	1,7038

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.4**

CURVA DE ANALISIS pH = 8



Fuente: Gráfico utilizando los datos de la tabla 5.6

- e) Isotermas de adsorción. - Con los datos de la Tabla N° 4.4 (Ver pág. N° 45) se obtuvo los resultados de la tabla 5.7 y el gráfico expresado en la Figura N° 5.5 (Ver pág. N° 53) el cual demuestra los resultados de la concentración inicial del  $Pb^{2+}$  donde indica el porcentaje de remoción del ion plomo metálico. La Figura N° 5.5 señala la isoterma



de adsorción con los datos que se obtuvieron con dichos experimentos.

**Tabla N° 5.7**

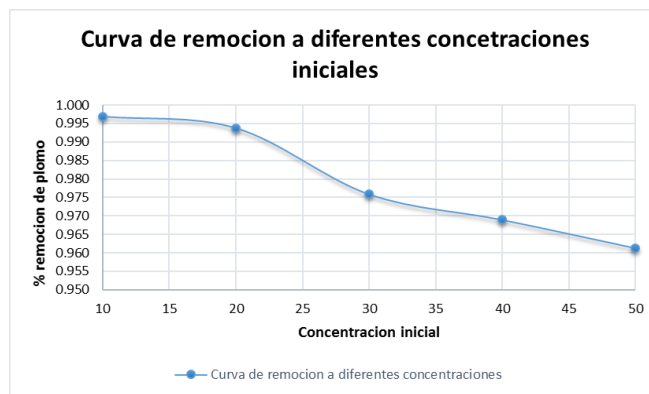
**VALORES DE LA ISOTERMA DE ADSORCION**

N°	Co Pb (mg/L)	Cf Pb (mg/L)	% remoción Pb	qe (mg/g)
1	10	0,0314	99,69%	0,14241
2	20	0,1253	99,37%	0,28392
3	30	0,7246	97,58%	0,41822
4	40	1,2431	96,89%	0,55367
5	50	1,9356	96,13%	0,68663

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.5**

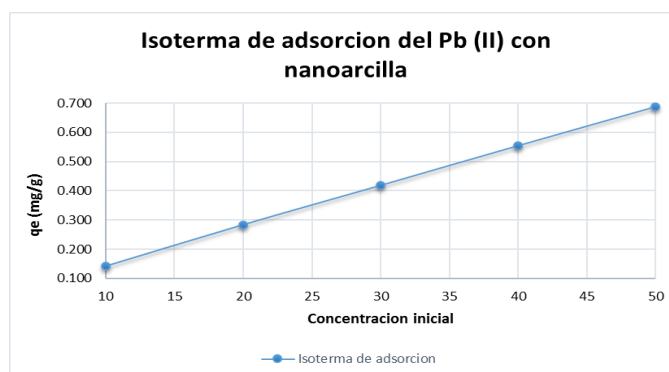
**CURVA DE REMOCION**



Fuente: Gráfico utilizando los datos de la tabla 5.7

**Figura N° 5.6**

**CURVA DE ISOTERMA DE ADSORCION**



Fuente: Grafico obtenido de la tabla N° 5.7

f) Modelos cinéticos de adsorción:

➤ Isoterma de Langmuir

Esta ecuación puede ser expresada calculando matemáticamente de los datos teóricos, obteniendo la siguiente forma lineal:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{e,max}} + \frac{1}{q_{e,max}K_L}$$

**Tabla N° 5.8**

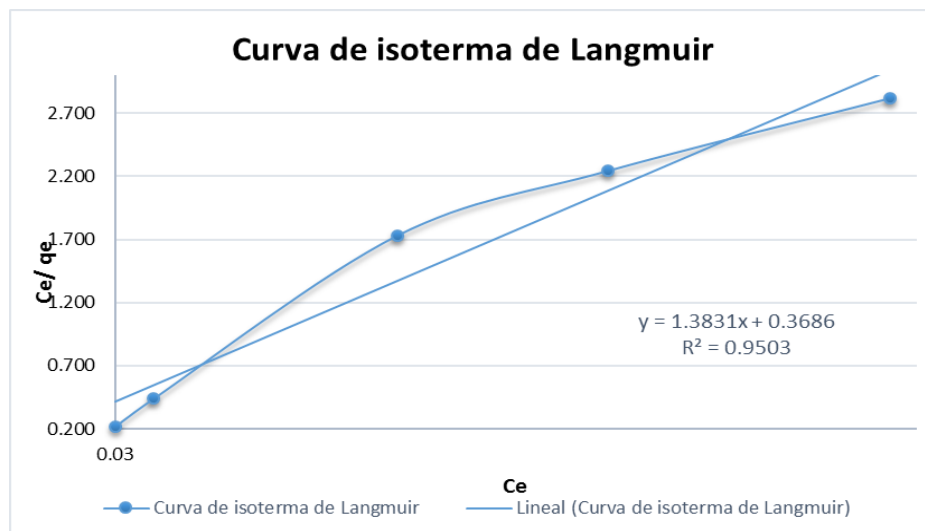
VALORES DE LA ISOTERMA DE LANGMUIR

N°	Co Pb (mg/L)	Ce Pb (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe
1	10	0.0314	0.14241	0.220492
2	20	0.1253	0.28392	0.441315
3	30	0.7246	0.41822	1.732581
4	40	1.2431	0.55367	2.245200
5	50	1.9356	0.68663	2.818968

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 5.7**

CURVA DE ISOTERMA DE LANGMUIR



Fuente: Gráfico utilizando los datos de la tabla 5.8.

La ecuación de Langmuir se expresa de manera lineal para la adsorción de  $Pb^{2+}$  sobre nanoarcilla y se demuestra en los siguientes datos y determina los siguientes resultados:

$$q_{e \max} = 0.7230$$

$$K_L = 3.7523$$

➤ Isoterma de Freundlich

Obtenido la ecuación definida en el marco teórico simplificamos matemáticamente la linealidad de la ecuación, expresada de la siguiente:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

**Tabla N° 5.9**

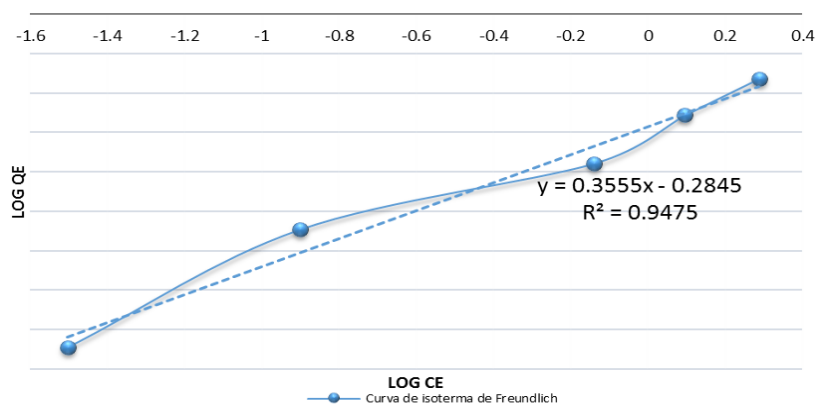
VALORES DE LA ISOTERMA DE FREUNDLICH

N°	Co Pb (mg/L)	Ce Pb (mg/L)	qe (mg/g)	Log Ce	Log qe
1	10	0.0314	0.14241	-1.50307	-0.846464
2	20	0.1253	0.28392	-0.90205	-0.546797
3	30	0.7246	0.41822	-0.1399	-0.378595
4	40	1.2431	0.55367	0.094506	-0.256749
5	50	1.9356	0.68663	0.286816	-0.163275

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 5.8**

CURVA DE ISOTERMA DE FREUNDLICH



Fuente: Grafico obtenido de la tabla N° 5.9

De donde se obtiene diferentes valores (ver Tabla N° 5.9) se deduce:

$$K_f = 2.2673$$

$$n = 2.8129$$

## 5.2. Resultados inferenciales

### a) Diseño factorial de múltiples niveles

Resumen del diseño

Se utilizó el resumen del diseño para examinar sus propiedades clave del diseño de investigación. La mayoría de las propiedades del diseño coinciden con la selección que se realizó para el diseño base. El resumen del diseño incluye las corridas en todas las réplicas, en esta investigación consideramos solo una réplica.

**Tabla N° 5.10**

#### VALORES DEL RESUMEN DEL DISEÑO

Factores:	3	Réplicas:	1
Corridas base:	27	Total de corridas:	27
Bloques base:	1	Total de bloques:	1
Número de niveles:	3; 3; 3		

Fuente: Elaboración propia.

### b) Regresión factorial general

Información del factor

En la fase de la experimentación para determinar el grado de acidez y el tiempo de contacto se trabajó con un diseño factorial de 33. Minitab nos pide ingresar los datos, en este caso tenemos 3 variables con 3 niveles.

**Tabla N° 5.11**

#### VALORES DE INFORMACION DEL FACTOR

Factor	Niveles	Valores
pH	3	4; 6; 8
Masa optima	3	3.3; 3.5; 3.7
Tiempo de contacto	3	30; 60; 90

Fuente: Elaboración propia.

## Resumen del modelo

Para determinar que nuestros resultados analizados por absorción atómica, se examinó los estadísticos de bondad de ajuste en la tabla de resumen del modelo.

Donde:

- S: evalúa qué tan bien el modelo describe la respuesta. Mientras más bajo sea el valor de S, mejor describirá el modelo la respuesta.
- R-cuad.: mientras mayor sea el valor de  $R^2$ , mejor se ajustará el modelo a los datos.  $R^2$  siempre está entre 0% y 100%.
- R-cuad. (ajust): el valor de  $R^2$  ajustado incorpora el número de predictores del modelo para ayudar a elegir el modelo correcto.
- R-cuad. (pred): determinar qué tan bien el modelo predice la respuesta para nuevas observaciones.

**Tabla N° 5.12**

### RESULTADOS DE INFORMACIÓN DEL FACTOR

S	R-cuad.	R-cuad.	R-cuad.
		(ajustado)	(pred)
1.33422	99.89%	99.63%	98.70%

Fuente: Elaboración propia.

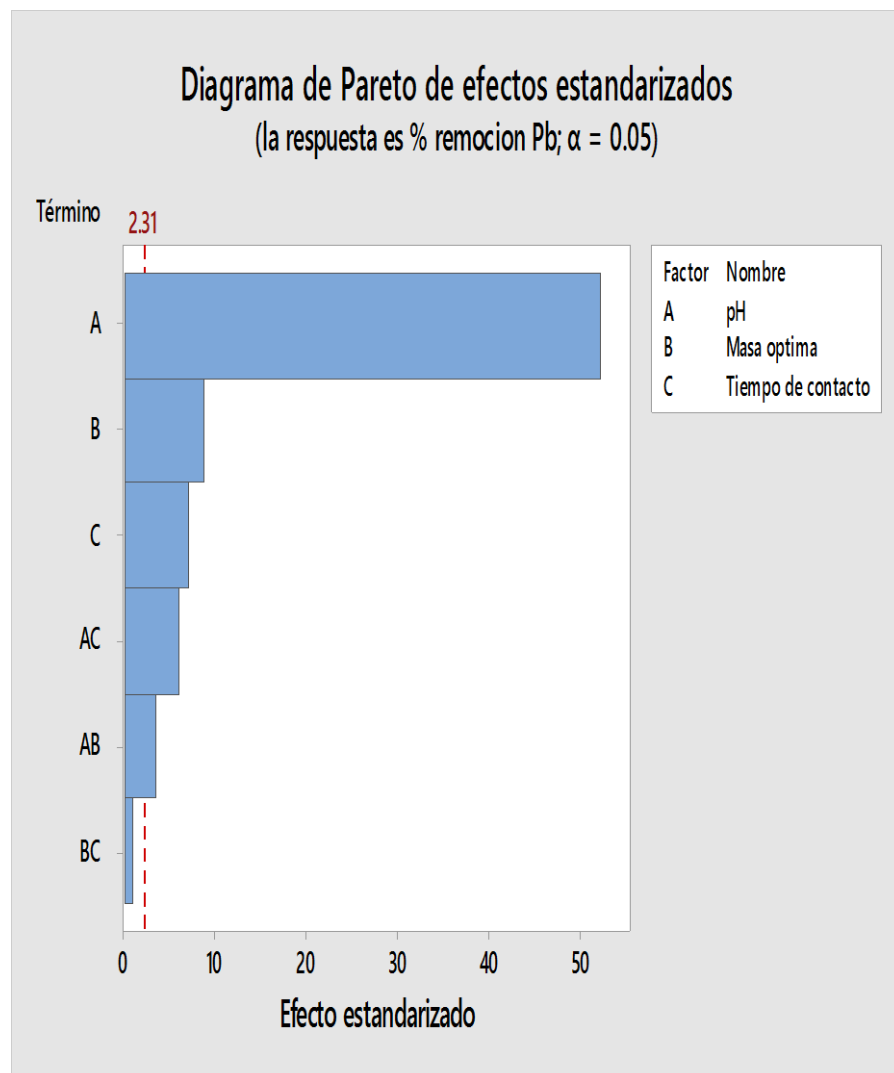
### Pareto de los efectos para % remoción Pb

El diagrama de Pareto nos muestra los efectos para comparar la magnitud relativa y la significancia ( $\alpha$  = nivel de confianza) estadística tanto de los efectos principales como de interacción. En estos resultados, cinco efectos principales son estadísticamente significativos ( $\alpha$  = 0.05). Además, usted puede observar que el efecto más grande es el pH (A) porque es el que

más se extiende. El efecto para la interacción de pH y masa óptima es el más pequeño porque es el que menos se extiende.

**Figura N° 5.9**

**DIAGRAMA DE PARETO**



Fuente: Elaboración propia.

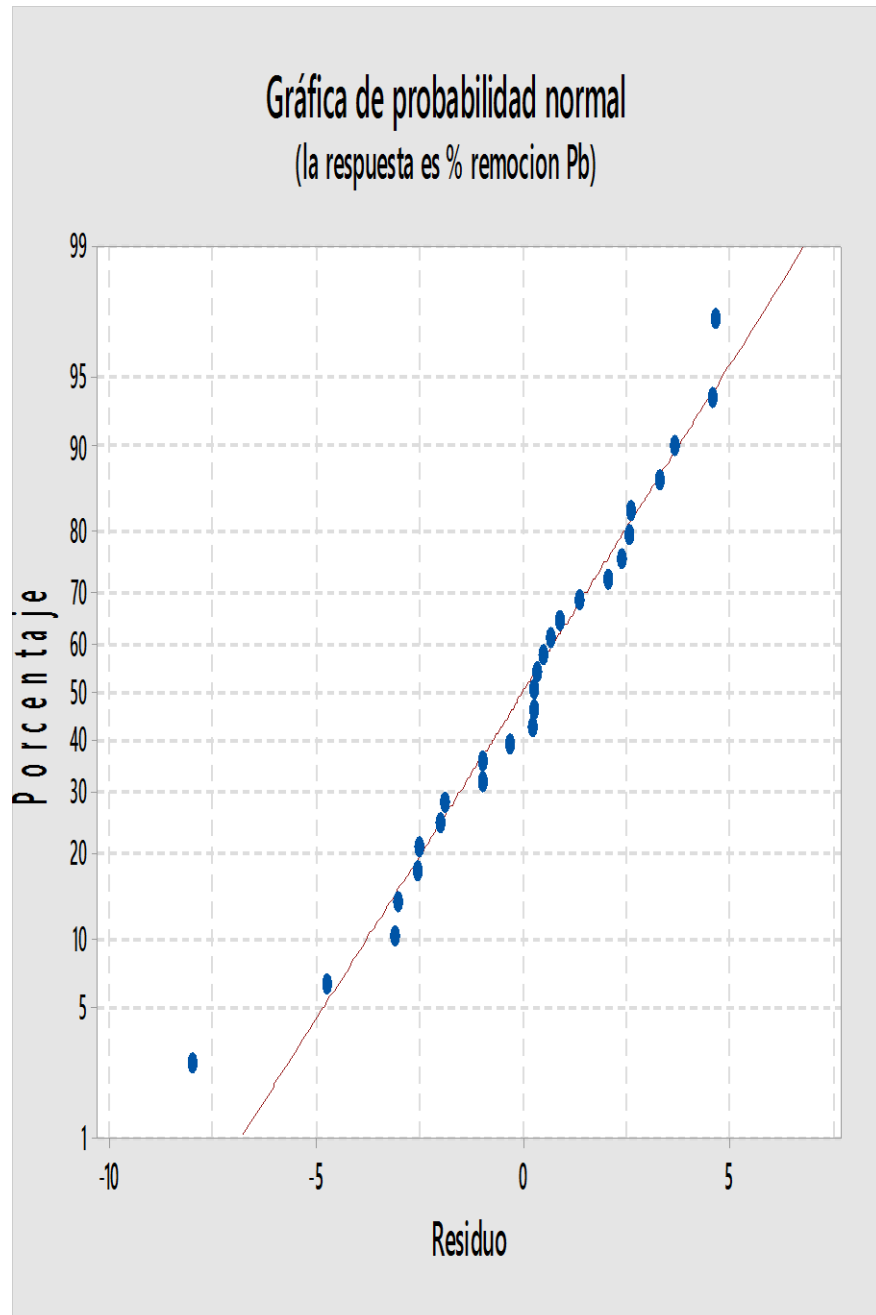
**Grafica normal de residuos para % remoción de Pb**

La gráfica de probabilidad normal de los residuos muestra los residuos vs. sus valores esperados cuando la distribución es normal. La gráfica de probabilidad normal de los residuos debe seguir aproximadamente una línea recta.

Estos resultados indican una correcta lineación lo cual nos indica que nuestros resultados analizados por absorción atómica se ajustan a la gráfica normal de residuos para % remoción de Pb.

**Figura N° 5.10**

**GRAFICA DE PROBABILIDAD NORMAL**



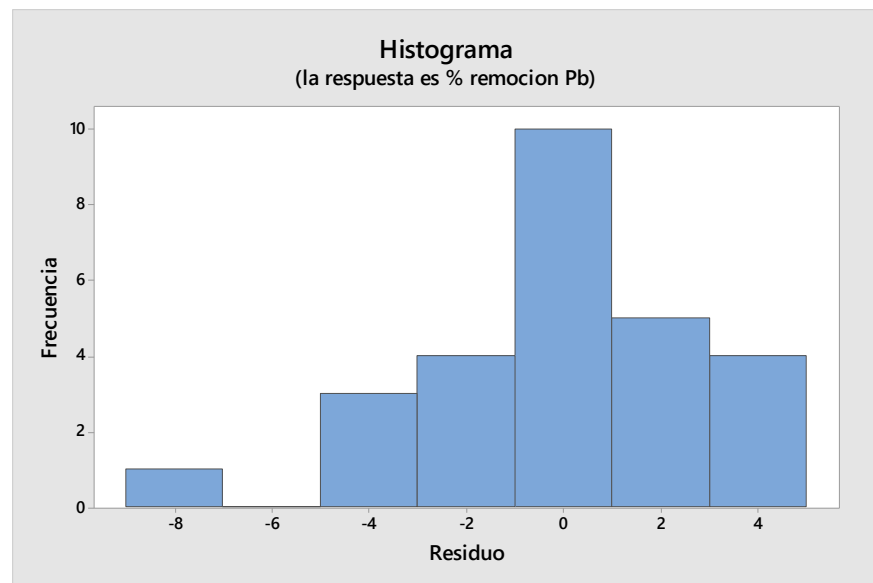
Fuente: Elaboración propia

### Histograma de residuos para % remoción de Pb

El histograma de los residuos estandarizados muestra la distribución de los residuos estandarizados para todas las observaciones. Analizando el histograma se determina que los datos son asimétricos.

**Figura N° 5.11**

#### HISTOGRAMA DE RESIDUOS



Fuente: Elaboración propia.

### Gráfica de efectos principales para % remoción de Pb

Una gráfica de efectos principales lo utilizamos para examinar las diferencias entre las medias de nivel para uno o más factores. Hay un efecto principal cuando diferentes niveles de un factor afectan la respuesta de manera diferente. Una gráfica de efectos principales grafica la media de respuesta para cada nivel de factor conectado por una línea.

Patrones generales que se concluyeron fueron:

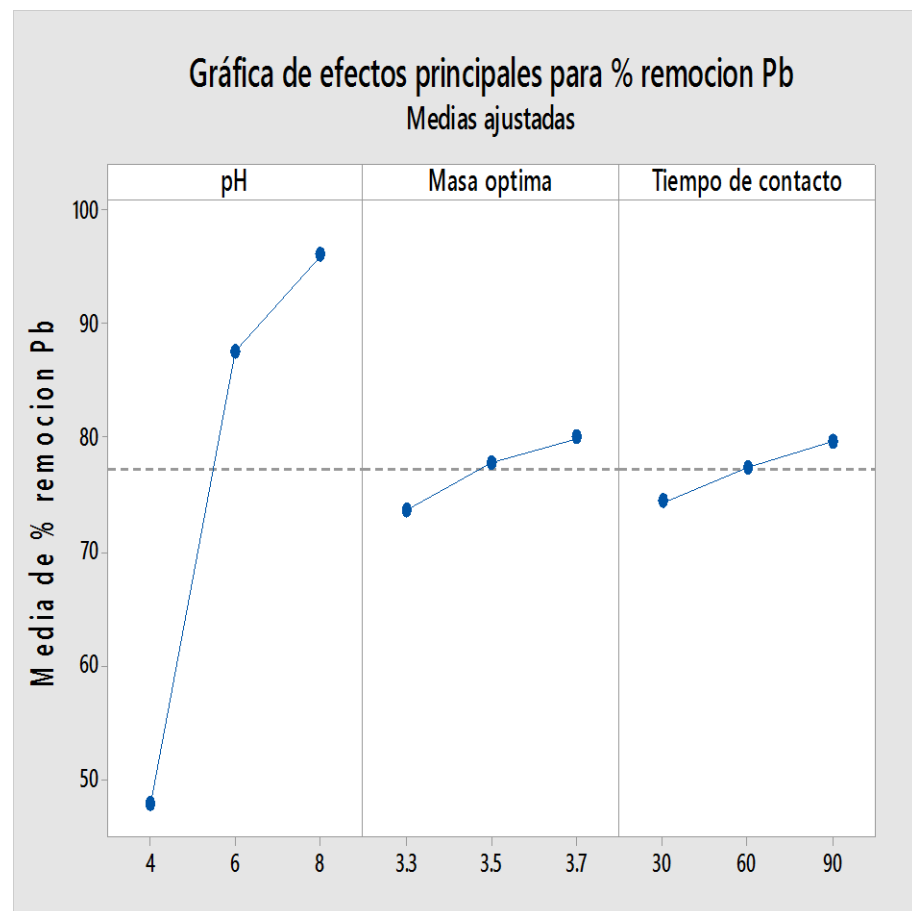
El pH tiene una lineal vertical lo que indica que tiene un mayor efecto y por ende es la principal variable para la adsorción del  $Pb^{2+}$ , mientras tiempo de contacto y la masa optima tiene una



tendencia a una línea horizontal lo que no indica que tienen un efecto principal para la adsorción del  $Pb^{2+}$ .

**Figura N° 5.12**

**GRAFICA DE EFECTOS PRINCIPALES % PLOMO**



Fuente: Elaboración propia.

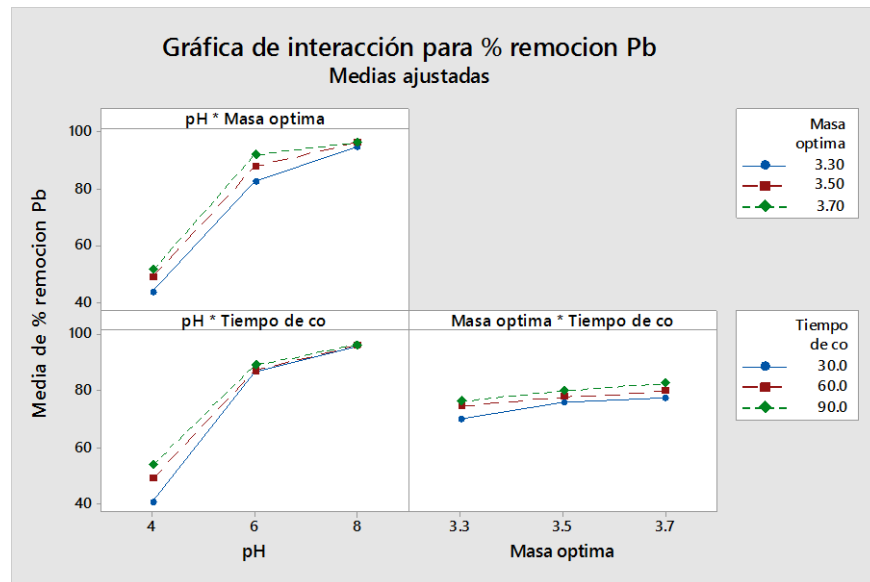
#### Gráfica de interacción % remoción de Pb

El efecto de un factor depende del nivel del otro factor, se puede utilizar una gráfica de interacción para visualizar las posibles interacciones. Las líneas paralelas en una gráfica de interacción indican que no hay interacción. Mientras mayor sea la diferencia en la pendiente entre las líneas, mayor será el grado de interacción.

Analizando el grafico podemos notar que hay una mayor pendiente cuando utilizamos en factor pH.

**Figura N° 5.13**

**GRAFICA DE INTERACCION % PLOMO**



Fuente: Elaboración propia.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación de la hipótesis

#### 1) Hipótesis general

H<sub>0</sub>: El empleo de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana no hace posible la adsorción del Pb<sup>2+</sup> presentes en soluciones acuosas.

H<sub>1</sub>: El empleo de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana hace posible la adsorción del Pb<sup>2+</sup> presentes en soluciones acuosas.

- En los resultados se refleja que la adsorción de iones Pb<sup>2+</sup> si es factible utilizando la nanoarcilla (bentonita activada), además se demostró que para un pH 8, tiempo de contacto de 30 minutos y peso 3.7 g, el mejor porcentaje de remoción fue de 96.4162%.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis H<sub>1</sub> (Hipótesis alterna) planteada.

#### 2) Hipótesis específica 1

H<sub>0</sub>: La masa óptima de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana no permite obtener un adsorbente adecuado en la adsorción de iones Pb<sup>2+</sup> en soluciones acuosas.

H<sub>1</sub>: La masa óptima de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana permite obtener un adsorbente adecuado en la adsorción de iones Pb<sup>2+</sup> en soluciones acuosas.

- Las gráficas que se obtuvieron en los resultados descriptivos mediante un análisis por absorción atómica (ver tabla 5.2) se observa que el rango de masa óptima para un volumen de 50 ml es de 3.5 g, en cambio a otras masas el porcentaje de remoción fue deficiente.
- En la tabla 5.3 se observa los resultados de porcentaje de remoción del plomo utilizando rango de masa de 3.3 a 3.7 g. este cuadro muestra que a un peso de 3.7 g se obtiene un

mayor porcentaje de remoción, en cambio a otros pesos dentro de ese rango presenta bajo porcentaje de remoción debido a otras variables como el pH y tiempo de contacto.

- En los resultados estadístico (Minitab) se demuestra que la masa optima es un efecto principal debido a que son estadísticamente significativos ( $\alpha > 0.05$ ), sin embargo, el pH es mucho más significativo por tener una mayor significancia (ver figura N° 5.9).

Por lo tanto, se acepta la hipótesis  $H_1$  (Hipótesis alterna) planteada.

### 3) Hipótesis específica 2

$H_0$ : El tiempo de contacto y grado de acidez no influyen en la adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Escudero- Sullana.

$H_1$ : El tiempo de contacto y grado de acidez influyen en la adsorción de  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana.

- Las gráficas que se obtuvieron en los resultados descriptivos mediante un análisis por absorción atómica (ver tabla 5.3) se demostró para un pH 8, tiempo de contacto de 30 minutos y peso 3.7 g, el mejor porcentaje de remoción el cual fue de 96.4162% lo cual nos indica que estas variables son determinantes para la adsorción del plomo. sin embargo, con un mayor tiempo de contactos se nota un incremento en el porcentaje de remoción, pero no es muy significativo y más aún si esto implica un mayor tiempo de contacto, lo cual nos representaría mayores costos en los procesos.
- En los resultados estadístico (Minitab) se demuestra que el grado de acidez y tiempo de contacto son efectos principales debido a que son estadísticamente significativos ( $\alpha > 0.05$ ), sin

embargo, el pH es mucho más significativo que el tiempo de contacto por tener una mayor significancia (ver figura N° 5.9).

Por lo tanto, se acepta la hipótesis H<sub>1</sub> (Hipótesis alterna) planteada.

#### 4) Hipótesis específica 3

H<sub>0</sub>: El isoterma que mejor se adecua al proceso de la adsorción de iones Pb<sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero-Sullana es la de Freundlich.

H<sub>1</sub>: El isoterma de Langmuir que se adecua al proceso de la adsorción de iones Pb<sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana.

- Las gráficas que se obtuvieron en los resultados descriptivos mediante un análisis por absorción atómica y cálculos matemáticos (ver tabla 5.12). Se demuestra que el modelo de Langmuir con respecto al modelo Freundlich se ajusta mejor a los resultados experimentales. Esto se determina con los valores de coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) de 0,9503 para Langmuir con respecto a los valores de Freundlich, siendo de 0,9475.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis H<sub>1</sub> (Hipótesis alterna) planteada.

**Tabla N° 5.13**

#### VALORES DE LANGMUIR Y FREUNDLICH

Isoterma de Langmuir			Isoterma de Freundlich		
q <sub>e</sub> , max (mg/g)	KL	R <sup>2</sup>	K <sub>f</sub>	n	R <sup>2</sup>
0.723	3.7523	0.9503	2.2673	2.8129	0.9475

Fuente: Elaboración propia

### 6.2. Contrastación de resultados con otros estudios

- Meza Ramos Yoselin y Mallaupoma Muños Luis (2018) es su estudio de “Adsorción de iones Cu<sup>+2</sup> desde soluciones acuosas

utilizando nanoarcilla” determinaron la masa optima, luego de que la solución acuosa de iones  $\text{Cu}^{+2}$  a 50 mg/L reaccionara con distintas cantidades de peso de adsorbentes. La adsorción llego al equilibrio 2,8 g de nanoarcilla, observándose un porcentaje de remoción de 77,3%. Es esta investigación se toma como ion al plomo donde se necesita 3.7 g para llegar a su máxima capacidad de adsorción.

- ii. Arriola Marquez Mariela y Rojas Pomalima (2017) en su informe de *“Síntesis y caracterización de nanoarcillas a partir de montmorillonita utilizando sales de amonio”* se determinó que la montmorillonita tiene capacidad de un adsorbente para metales pesados en donde se considera importante las variables del efecto del grado de acidez y el tiempo de contacto. En este análisis se obtuvo el área superficial del adsorbente es de 82,8818  $\text{m}^2/\text{g}$ . Los niveles óptimos que se determinaron fueron pH 8, con un porcentaje de adsorción máxima de 95,213% y una concentración final a 0,957 mg  $\text{Cr}^{+4}/\text{l}$ .

Es esta investigación se determinó la concentración del  $\text{Pb}^{2+}$  con un porcentaje de remoción de 96.4162% para un pH 8, tiempo de contacto de 30 minutos y peso 3.7 g.

- iii. Miranda Cruz Edith y Aguirre Gomez Arturo (2002) en su investigación *“Efecto de la presencia de ligantes orgánicos y del pH en la adsorción de Cd y Pb en la bentonita”* diseñaron esta investigación con el objetivo de identificar el comportamiento del grado de acidez en la adsorción de  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Cd}^{+2}$  utilizando la bentonita sódica en soluciones acuosas. Se ajustaron los tres modelos de isotermas de adsorción (Langmuir, Freundlich y Henry) con ligantes orgánicos y también sin la misma. Los resultados fueron distintos en función al pH y para cada metal, estos resultados nos indica que la afinidad relativa de la arcilla por cada

metal es distinta y es mucho mejor utilizando ligantes orgánicos (arcilla modificada) en comparación de la adsorción sin los ligantes orgánicos (arcilla sola). Esta investigación también se concluyó la afinidad de la bentonita por los metales de  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$  a dos valores de pH y la importación de los modelos isotérmicos Langmuir, Freundlich y Henry.

Es nuestra investigación nuestros resultados óptimos se realizaron modificando la bentonita (nanoarcilla) y a la hicimos una comparación de modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich lo cual obtuvimos que los resultados utilizando el modelo de Langmuir se ajusta mejor que el modelo de Freundlich.

### **6.3. Responsabilidad ética**

La responsabilidad de esta investigación en función al problema, los objetivos y resultados se basó bajo las siguientes responsabilidades:

- El análisis de los resultados se realizó en una empresa comercializadora de minerales que se encarga de analizar muestras en soluciones acuosas por absorción atómica. En esta investigación los certificados fueron entregados y adjuntados en el anexo.
- Las practicas que se realizaron para determinar los resultados se efectuaron siguiendo procedimientos de las investigaciones (antecedentes de estudio).
- Las muestras de minerales se obtuvieron del departamento de Piura realizando las pruebas correspondientes según procedimientos metalúrgicos, de esta manera se logró obtener una muestra representativa para su posterior análisis.

## VII. CONCLUSIONES

- i. Se evidencio de manera experimental con los datos obtenidos de la adsorción de iones  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla (bentonita), que de acuerdo al procedimiento establecido teóricamente, se presenta un potencial atractivo como adsorbente de iones  $Pb^{2+}$ , obteniéndose como mayor porcentaje de remoción de 96.4162%.
- ii. Los parámetros óptimos en donde se obtuvo un alto grado de porcentaje de remoción de iones  $Pb^{2+}$  fueron con masa óptima de 3.7g.
- iii. El grado de acidez y tiempo de contacto son efectos principales debido a que son estadísticamente significativos ( $\alpha > 0.05$ ) de acuerdo al diagrama de Pareto, sin embargo, el pH es mucho más significativo que el tiempo de contacto y la masa óptima por tener una mayor significancia.
- iv. La adsorción de ion plomo en soluciones acuosas se describe mejor bajo el modelo de Langmuir, pues su índice de correlación lineal obtenido fue 0,9503 a comparación del modelo de Freundlich que fue de 0,9475.



## VIII. RECOMENDACIONES

1. Recomendamos se profundice el estudio de la adsorción del ion plomo en soluciones acuosas a diferentes temperaturas para poder ver la influencia de la misma.
2. Investigar para un mayor grado de análisis el sistema en planta piloto con el objetivo de implementarse en la producción industrial, ya que de esta forma podríamos de aportan aún más al cuidado del medio ambiente.
3. Para la reducción de la humedad se recomienda buscar un óptimo almacenamiento de la nanoarcilla.
4. Se recomienda evaluar y analizar otros tipos de modificaciones utilizando la bentonita.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aduato Ureta Anais Elena (2017). *Evaluación de la capacidad de adsorción de las arcillas organofílicas para la adsorción de nitratos y nitritos en soluciones acuosas*. (Magíster en Química). Repositorio institucional Pontificia Universidad Católica del Perú. Disponible en: [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/9286/ADAUTO ANAIS ARCILLAS ADSORCION.pdf](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/9286/ADAUTO_ANAIS_ARCILLAS_ADSORCION.pdf). 24-25.
2. Anaya E. (2007). *Determinación de metales pesados en agua residual en procesos de galvanoplastia*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara. 46- 49.
3. Andrade L., Covelo E. y Vega F. (2005). *Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales*. Información tecnológica-Vol. 16 N°1. [Disponible en Ítem]. Universidad de Vigo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. 3-10.
4. Arriola Márquez Mariela Carolin y Rojas Pomalima Pamela Lizbeth (2017). *Síntesis y caracterización de nanoarcillas a partir de montmorillonita utilizando sales de amonio*. (Ingeniero Químico Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Repositorio institucional- UNCP.
5. Cabañas C. María José (1998). *Estudio de los niveles de plumbemia en la comunidad autonoma de madrid*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. 31-32.
6. Decreto Supremo N° 004-2017 MINAM (2015). **Diario Oficial El Peruano**. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
7. Dirección General de Desarrollo Minero (2014). *Perfil de Mercado de la bentonita*. 10- 21.

8. Fernández Pino Fernando (2011). *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5567/pm\\_bentonita\\_2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5567/pm_bentonita_2014.pdf). 16- 17.
9. Lacasaña M., Romieu I. y Connell R (1996). *El Problema de exposición al plomo en América Latina y el Caribe, México*. Mexico: Grupo de trabajo OPS. 9- 11.
10. Meza Ramos Yoselin Rossy y Mallaupoma Muños Luis Alberto (2018). *Adsorción de iones  $Cu^{+2}$  desde soluciones acuosas utilizando nanoarcillas*. (Ingeniero Químico Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Repositorio institucional-UNCP.
11. Miranda Cruz Edith y Aguirre Gómez Arturo (2002). *Efecto de la presencia de ligantes orgánicos y del pH en la adsorción de Cd y Pb en la bentonita*. [Disponible en Ítem]. Rev. Int. Contam. Ambient, 1-2.
12. Moncada Azabache Elba y Pomiano Bocanegra Katherin (2018). *Evaluación de la biosorción de iones  $Zn^{+2}$  mediante la cáscara de naranja (citrus síntesis) modificada*. (grado de Ingeniero Químico).
13. Obregón Valencia Daniel Cristopher (2012). *Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna*. (Licenciado en Química). Repositorio institucional - PUCP. Disponible en: [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5717/OBREGON\\_DANIEL\\_ADSORCION\\_CADMIO.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5717/OBREGON_DANIEL_ADSORCION_CADMIO.pdf?sequence=1). 10- 11.
14. Ochoa Huerta Sergio (2001). *Planta Piloto de Fermentaciones-Adsorción*. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.

Departamento de Biotecnología. 2-3 Disponible en:  
<http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Adsorcion.pdf>.

15. Price H., Arthur R. y Sexton K., 2010 (2010). *Their collection and characterization. Journal Toxicology Environmental Health A. Airborne particles in Swansea.* 43- 44.
16. Rodríguez Alexis y Cuellar Liliam (2001). *Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre.* Ciudad de la Habana: Rev Cubana Invest Bioméd Vol.35 N° 3.
17. Sun Kou Maria del Rosario (1999). *Modificación de arcillas naturales para su posterior uso como adsorbentes.* [Disponible en Ítem]. Revista de Química Vol. XIII, 7-10.

# **ANEXOS**

## A.1 MATRIZ DE CONSISTENCIA

### “EVALUACION DE LA ADSORCION DE Pb<sup>2+</sup> EN SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE LA NANOARCILLA (BENTONITA) DE LA PROVINCIA DE IGNACIO ESCUDERO- SULLANA”

Problema General	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Métodos
¿Cómo evaluar la adsorción de iones Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana?	Evaluar la adsorción de iones Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana.	El empleo de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana hace posible la adsorción del Pb <sup>2+</sup> presentes en soluciones acuosas	Y = Evaluación de la adsorción de iones Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas.	– Remoción de Pb <sup>2+</sup> .	– Porcentaje	– Absorción atómica.
Problema específico	Objetivos específicos	Hipótesis específicos	Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores	Métodos
¿Cuáles es la masa óptima para la adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana?	Determinar la masa óptima para la adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero- Sullana.	La masa optima de la nanoarcilla (Bentonita) del distrito de Ignacio Escudero – Sullana. Permite obtener un adsorbente adecuado en la adsorción de iones Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas.	X 1 = Masa Optima	– Peso.	– Gramos.	– Balanza digital.
¿Cómo verificamos el tiempo de contacto y grado de acidez en el proceso de adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero- Sullana?	Determinar el tiempo de contacto y grado de acidez del proceso de adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero- Sullana?	El tiempo de contacto y grado de acidez influyen en la adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana.	X2 = Tiempo de contacto y grado de acidez.	– Tiempo – pH.	– Minutos. – Adimensional.	– Cronometro – Potenciómetro.
¿Cuál sería el modelo isotérmico de adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas que mejor se adecue al proceso utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero- Sullana?	Establecer el modelo isotérmico de adsorción de Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas que mejor se adecue al proceso utilizando la nanoarcilla del distrito Ignacio Escudero – Sullana?	La isoterma que mejor se adecua al proceso de la adsorción de iones Pb <sup>2+</sup> en soluciones acuosas mediante la nanoarcilla (Bentonita) del distrito Ignacio Escudero- Sullana es la de Langmuir.	X3 = Modelo de ecuación.	– Modelo de ecuación isotérmico.	– mg/g	– Análisis matemático.