



El saber de mis  
hijos hará mi  
grandeza

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

## **ADSORCIÓN DE PLOMO EN ZEOLITA NATURAL (CHABAZITA) PRE-TRATADA**

**TESIS**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

Presenta:

**FRANCISCO JAVIER CUEVAS FELIX**

Hermosillo, Sonora

Septiembre 2017

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## DEDICATORIA

A mis padres, Francisco Javier Cuevas González y Luz Del Carmen Félix Enríquez, ya que gracias a ellos hoy estoy culminando este ciclo tan importante de mi vida. Estoy infinitamente agradecido por su ayuda y apoyo incondicional en todo momento de mi vida, desarrollo escolar y profesional.

A mis hermanas, Luz Del Carmen Cuevas Félix y Luz Ailyn Cuevas Félix por su paciencia y comprensión en todo momento de mi vida.

A todos mis amigos, por toda su ayuda, comprensión, compañía, discusiones y soluciones que hemos tenido en esta vida.

Gracias a todos ustedes por acompañarme y formar parte en mi vida, darme ese apoyo tan valioso y estar presentes en los mejores y no tan mejores momentos de mi vida.

¡¡¡Muchas, Muchas Gracias!!!

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de Sonora, al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, al Laboratorio de Metrología y al Laboratorio de Procesamiento Acuoso; por todo el apoyo necesario para llevar a cabo este proyecto de investigación.

A mi directora de tesis, Dra. Flérida Adriana Mejía Zamudio, muchas gracias por su comprensión, paciencia, tiempo, dedicación, su apoyo y ayuda incondicional para la motivación y realización de este proyecto.

A mis sinodales, M.C. Jesús Leonel Servín Rodríguez, Dr. Paul Zavala Rivera, Dra. Kareen Encinas Soto, por su cooperación, comprensión, ayuda y tiempo dedicado para realizar este proyecto.

A mis compañeros de generación, quienes me ayudaron y motivaron para continuar con este proyecto; especialmente a Ricardo Arana Amaya y Grecia Calles Coronado, por acompañarme en todos los años de carrera y por su gran amistad incondicional.

## INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS .....	vii
INDICE DE TABLAS .....	viii
RESUMEN .....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
I.1 Introducción .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
II.1 Objetivo general .....	3
II.2 Objetivos particulares .....	3
III. ANTECEDENTES .....	4
III.1 Plomo.....	4
III.1.2 Fuentes de exposición.....	7
III.1.3 Contaminación de agua por plomo.....	7
III.2 Normatividad para calidad del agua.....	9
III.3 Técnicas de remoción de plomo del agua .....	11
III.4 Adsorción.....	14
III.4.1 Modelo de Langmuir.....	14
III.4.2 Modelo de Freundlich .....	15
III.5 Zeolitas .....	16
III.5.3 Adsorción de plomo con zeolitas .....	19
IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	22
IV.1 Materiales y equipo .....	22
IV.2 Sitio de muestreo.....	22
IV.3 Desarrollo experimental.....	23
IV.3.1 Proceso de trituración .....	23
IV.3.2 Pre-tratamiento con MgO .....	24

IV.3.3 Preparación de soluciones .....	26
IV.4 Pruebas de adsorción.....	26
IV.5 Isotermas de adsorción .....	28
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
V.1 Adsorción de plomo.....	29
V.2 Isotermas de adsorción para plomo en zeolita .....	33
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
VI.1 Conclusiones.....	36
VI.2 Recomendaciones.....	37
VII. ANEXOS.....	38
A. Tablas de resultados de adsorción.....	38
B. Tablas de resultados de isotermas de adsorción .....	43
BIBLIOGRAFIA .....	46

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama de Pourbaix para el sistema Pb-H <sub>2</sub> O.	6
2	Estructura cristalina de una zeolita natural tipo Chabazita.	18
3	Grafica comparativa de porcentajes de remoción de plomo contra tipo de zeolita.	21
4	Localización del sitio de muestreo en Divisaderos, Sonora, México.	23
5	Proceso de pre-tratamiento con óxido de magnesio para una zeolita natural chabazita.	25
6	Efecto del tiempo de contacto con el porcentaje de plomo adsorbido para la zeolita natural (ZSP) y la zeolita pre-tratada (ZPO).	29
7	Efecto de las concentraciones iniciales en la adsorción de plomo para zeolita natural y pre-tratada.	30
8	Efecto de la relación sólido/líquido en la adsorción de plomo para ZPO.	31
9	Efecto del pH en la adsorción de plomo para ZPO.	32
10	Isoterma de adsorción de Freundlich para ZPO.	33
11	Isoterma de adsorción de Langmuir para ZPO.	34

## INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
I	Límites máximos permisibles de concentraciones de plomo establecido por varios países y agencias reguladoras.	10
II	Ventajas y desventajas de los principales métodos de remoción de plomo en agua.	13
III	Estructura de algunas zeolitas naturales.	17
IV	Parámetros utilizados en las pruebas de adsorción.	27
V	Parámetros utilizados en isotermas de adsorción.	28
VI	Parámetros de los modelos de Langmuir, Freundlich y sus correspondientes coeficientes de correlación.	35

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación surgió por la necesidad e importancia ambiental que existe en México, haciendo énfasis en la contaminación de plomo en aguas de consumo humano; ya que, es bien conocido que la acumulación de plomo en el cuerpo humano, aun en cantidades traza, es causante de importantes problemas de salud; como daño al sistema nervioso central, entre otros. A pesar de existir una gran cantidad de tecnologías para remoción de metales pesados en agua, los índices de contaminación han ido aumentando considerablemente a través del tiempo, por lo cual es importante desarrollar una metodología eficiente para la remoción de plomo en agua. En el presente trabajo se utilizó una zeolita natural Chabazita (ZSP), la cual se llevó por un proceso de pre-tratamiento con óxido de magnesio (MgO) para evaluar la capacidad de remoción de plomo y encontrar el efecto de los parámetros de adsorción como: concentración inicial, relación sólido/líquido (S/L), pH y tiempo de contacto. Así también, encontrar la isoterma de adsorción que mejor se ajuste a la zeolita pre-tratada en el proceso de adsorción. La zeolita pre-tratada con óxido de magnesio presentó resultados favorables para la adsorción de plomo en agua obteniendo valores de hasta el 99% de remoción. Los parámetros de adsorción más significativos en el proceso de adsorción fueron la concentración inicial y la relación sólido/líquido, aumentando los porcentajes de remoción hasta 99%. Los resultados experimentales se ajustaron mejor al modelo de la isoterma de Freundlich, obteniendo una constante de Freundlich (K) relacionada con la capacidad de adsorción de 3.3181.

# I. INTRODUCCIÓN

## I.1 Introducción

El Plomo es un peligro para los organismos vivos por su toxicidad y tendencia a acumularse en el medio ambiente. Con el crecimiento de las industrias, como ejemplo: metalurgia, pintura, baterías y papel; los desechos industriales obtenidos son descargados directa o indirectamente al medio ambiente. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos y el medio ambiente. (Kragović, 2011).

La presencia de Plomo en el agua es un gran problema de riesgo ambiental y de salud, debido a su toxicidad y porque su presencia es un verdadero problema; aún en cantidades traza, es muy tóxico y al ser dispuesto en cuerpos de agua causa serios trastornos a la salud humana y al ambiente (Trgo et al., 2006).

Las Zeolitas se componen principalmente de estructuras tetraédricas tridimensionales de  $AlO_4$  y  $SiO_4$ . Éstas se interconectan por compartición de oxígenos formando canales y cavidades bien definidos, conteniendo moléculas de agua, cationes alcalinos (Na, K, Li y Cs) y cationes alcalinotérreos (Ca, Sr, Ba y Mg) (Tschernich 1992).

Las propiedades fisicoquímicas de las zeolitas como su alta cristalinidad, cavidades sub-nanométricas y alta capacidad selectiva de adsorción, hacen a las zeolitas un buen adsorbente para metales pesados; además de ser abundantes en el medio ambiente, ser económicamente accesibles, no tóxicas, capacidad de regeneración del adsorbente y contar con altas eficiencias de adsorción (Wang, 2009).

Existe un gran número de técnicas para la separación de metales pesados de soluciones acuosas, las cuales incluyen: intercambio iónico, osmosis inversa, precipitado, adsorción, entre otras. La adsorción domina como técnica de separación más eficiente, es la que tiene más versatilidad para remover iones metálicos de soluciones; además de tener la capacidad de regenerarse y reutilizarse en el futuro, lo cual le da un costo de proceso más económico (Zvinowanda, 2009).

En el presente trabajo, se presenta un proceso de pre-tratamiento para una Zeolita natural (Chabazita) originaria de la zona La Palma (Divisaderos, Sonora) con oxido de magnesio (MgO); Para evaluar la capacidad de remoción de Plomo en una solución de agua con diversas concentraciones iniciales y encontrar los parámetros de adsorción con mayor relevancia para el proceso.

## **II. OBJETIVOS**

### **II.1 Objetivo general**

Evaluar el proceso de pre-tratado para una zeolita (Chabazita) con óxido de magnesio y evaluar su capacidad para remover Plomo de una solución de agua.

### **II.2 Objetivos particulares**

1. Comparar la capacidad de remoción de plomo entre la zeolita natural y pre-tratada.
2. Evaluar el efecto de los parámetros: pH, relación sólido líquido (S/L), concentración inicial, y tiempo de contacto, en la adsorción de Plomo en Zeolita.
3. Obtener la isoterma de adsorción de la zeolita pre-tratada.

### III. ANTECEDENTES

#### III.1 Plomo

El Plomo es un metal con símbolo Pb (del latín Plumbum), con número atómico 82 y masa atómica de 207.2 g/mol; tiene bajo punto de fusión y un color plateado con tono azulado; el plomo difícilmente se disuelve en agua en condiciones ambientales; sin embargo, otros compuestos de plomo como el carbonato de plomo ( $\text{PbCO}_3$ ) y el acetato de plomo ( $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ) son solubles en agua y considerados un problema. Es considerado como un metal tóxico debido a las propiedades que tiene de acumularse en seres vivos y afectar diversos organismos; por ejemplo: el sistema nervioso central (WHO, 2016).

El Plomo se presenta en el medio ambiente elementalmente o en forma de compuestos químicos debido a las siguientes causas:

- Naturales. Es la contaminación provocada por diversos factores o eventos naturales como terremotos, huracanes, erupciones volcánicas, inundaciones, entre otros fenómenos atmosféricos.
- Antropogénicas. Es la contaminación provocada por efecto o hechos humanos. Algunas de las actividades que provocan la contaminación antropogénica de plomo son la minería, la industria, la actividad agropecuaria, artesanal y doméstica.

Los compuestos químicos de Plomo pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Orgánicos. Son compuestos químicos que contienen carbono, formando enlaces Carbono-Carbono y Carbono-Hidrógeno.
- Inorgánicos. Son aquellos compuestos que están formados por distintos elementos, pero en los que su componente principal no siempre es el carbono (ATSDR, 2007)

La agencia internacional de investigación del cáncer (IARC) en el año 2006 declaró que el Plomo inorgánico es el más tóxico. Siendo este con el que existe mayor contacto y presentando altos porcentajes de absorción en el cuerpo humano. Sin embargo, el Plomo orgánico también es absorbido por medios cutáneos con porcentajes superiores al 90% (IARC, 2006).

El organismo humano puede absorber Plomo por medio de las vías respiratoria gastrointestinal y cutánea; una de las vías más significativas en el proceso de absorción de Plomo en el cuerpo es la respiratoria (Ramírez, 2005).

Algunos de los compuestos de Plomo que pueden estar presentes en el agua potable son:  $Pb^{2+}$ ,  $PbHCO_3^+$ ,  $PbCO$ ,  $Pb(CO_3)_2^{2-}$ ,  $Pb(OH)_2$ ,  $Pb(OH)^3-$ ,  $Pb(OH)_4^{2-}$ , los cuales se muestran en la Figura 1, representados en un diagrama de Pourbaix para el sistema  $H_2O$ -Plomo; el cual muestra el efecto del pH y estado de oxidación. Las especies sólidas insolubles han sido sombreadas. El plomo en  $PbO_2$  (óxido de plomo sólido) tiene un estado de oxidación de +4 [Pb(IV)], todas las demás especies en el diagrama tienen un estado de oxidación +2 [Pb(II)] (WRF, 2015).

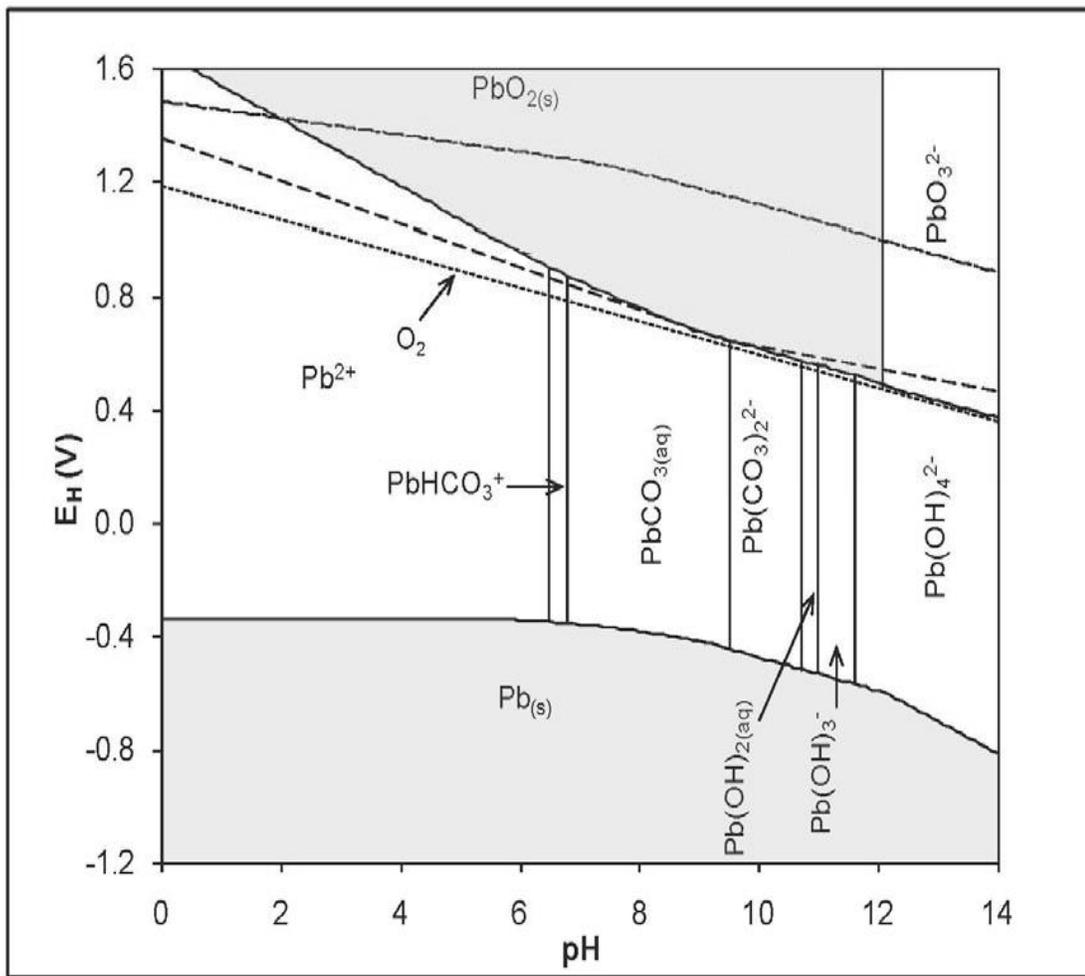


Figura 1. Diagrama de Pourbaix para el sistema Pb-H<sub>2</sub>O (WRF, 2015).

### **III.1.2 Fuentes de exposición**

El plomo puede ser absorbido en el cuerpo humano por alguna de las siguientes formas de contacto:

(a) *Inhalado*. Consiste en la depositación y absorción de partículas de plomo que han sido inhaladas por medio del tracto respiratorio. Aproximadamente el 95% del plomo inorgánico que es inhalado es absorbido.

(b) *Ingesta*. Consiste en la absorción de plomo por la vía gastrointestinal, el cual es causado por ingesta directa, ingesta de alimentos contaminados o ingesta de agua contaminada, principalmente. Esta es la principal forma de absorción de plomo que existe siendo la vía causante del 80% total del plomo absorbido en el cuerpo.

(c) *Cutánea*. La cual consiste en la absorción de plomo por contacto a través de la piel; es considerada mucho más pequeña que la ingesta o inhalación, sin embargo, estudios han demostrado que la cantidad absorbida por contacto cutáneo no puede ser ignorada. (Hursh et al. 1969, Wells et al. 1975).

### **III.1.3 Contaminación de agua por plomo**

La presencia de plomo en el agua es un gran problema de riesgo ambiental y de salud debido a su toxicidad y porque su exposición es un verdadero problema. El plomo, aún en cantidades traza es muy tóxico y al ser dispuesto en cuerpos de agua causa serios trastornos a la salud humana y al medio ambiente (Trgo et al. 2006).

Su presencia en el aire, el agua y el suelo está relacionada con problemas digestivos y respiratorios; así como con daño neurológico. La presencia de este tóxico en el medio ambiente crece año con año y no es biodegradable, por lo cual tiende a acumularse ambientalmente y en los organismos vivos (Alvarado et al., 2013).

Un estudio realizado en Sudán del Sur en el año 2016, encontró altas concentraciones de plomo en el cabello de personas habitantes de una región cercana a un campo de extracción de petróleo. Dicha contaminación fue causada por contaminación de aguas utilizadas para el riego, consumo humano y limpieza. El estudio encontró que la concentración media de plomo en el cabello fue de 4.2 µg/g, lo cual demuestra que existe un almacenamiento en el cuerpo y la presencia de contaminantes en el agua de consumo humano de la región (Fritz, 2016).

Una investigación realizada en el año 2006 determino los metales pesados a nivel traza en el agua de pozo en Navojoa, Sonora. La investigación consistió en tomar muestras directamente de los pozos, para determinar por el método de espectrofotometría, la cantidad de plomo disuelta o suspendida en el agua. Los resultados mostraron que el 95% de las muestras representativas de agua de pozo rebasaron los valores de los límites máximos permisibles de plomo establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994). Comprobando así, que existe una contaminación de plomo a nivel regional (Sur de Sonora) en el año que se realizó el proyecto de investigación. (Ayala, 2006).

### **III.2 Normatividad para calidad del agua**

El objetivo de una norma para la calidad de agua es regular y asegurar valores, cantidades y características mínimas o máximas en el diseño, producción o servicio de los bienes de consumo entre personas morales y/o personas físicas, sobre todo los de uso extenso y de fácil adquisición por parte del público en general, poniendo atención en especial en el público no especializado en la materia.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, WHO) en su guía de calidad de agua potable y de consumo humano publicada en el año 2010, propone un valor de concentración máximo de 0.01 mg/L de plomo disuelto o suspendido en agua potable y de consumo humano. (WHO, 2010)

En Estados Unidos de América, la USEPA (United States Environmental Protection Agency) es la agencia encargada de regular y controlar las concentraciones de Plomo en el agua potable y de consumo humano; esta norma es la LCR-1991 (Lead and Copper Rule 1991) la cual establece como límite máximo permisible para Plomo disuelto o suspendido en 0.015 mg/L (USEPA,1991).

En México la norma oficial encargada de regular las concentraciones de plomo para el agua potable es la NOM-127-SSA-1994 la cual establece los límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Con su reciente modificación en el año 2010; publicó que el límite máximo permisible de plomo en agua, ya sea disuelto o suspendido, es de 0.01 mg/L.

En la Tabla I, se presentan los valores de las concentraciones máximas permisibles de plomo disuelto o suspendido en agua potable y de consumo humano establecidos por diferentes organizaciones mundiales y países alrededor del mundo.

Tabla I. Límites máximos permisibles de concentraciones de plomo establecido por varios países y agencias reguladoras.

<b>País u Organización</b>	<b>[Pb] mg/L</b>
<b>México*</b>	<b>0.01</b>
EUA	0.015
UE	0.05
OMS	0.01
Perú	0.05
Argentina	0.05

\*NOM-127-SSA-1994.

### III.3 Técnicas de remoción de Plomo del agua

Existen muchas tecnologías para la remoción de plomo, las cuales cuentan con eficiencias de remoción de plomo en agua de hasta 99%, las tecnologías más sobresalientes son las siguientes:

(1) *Precipitación*. Es un método para la separación de metales de soluciones formando un hidróxido metálico. Los metales solubles pueden ser precipitados como hidróxidos usando diferentes agentes alcalinos, como por ejemplo CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub>OH. Los metales pesados como el plomo no precipitan a menos de pH= 7. Estudios realizados han demostrado que el método de precipitación cuenta con eficiencias de hasta el 98%, sin embargo, existen algunas limitantes para el proceso de separación, como por ejemplo la necesidad de trabajar a pH altos y la dificultad para el tratamiento de lodos (Djedidi en 2009).

(2) *Intercambio Iónico*. Es un proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto. Se ha demostrado que el plomo tiene una alta afinidad a ciertas resinas para el intercambio iónico. En el estudio realizado por A.S. Darwish en 2014 demuestra que el plomo es el metal pesado con mayor afinidad para el intercambio iónico en una resina utilizada en su investigación, obteniendo porcentajes de remoción de plomo de hasta 98%. (Darwish, 2014).

(3) *Biosorción*. La biosorción es una tecnología la cual utiliza la habilidad de materiales orgánicos para acumular metales pesados de soluciones acuosas. Ejemplos de adsorbentes son: salvados de arroz, cascara de cacahuate, cascara de almendras, tronco de tabaco, entre otros. Una investigación realizada con semillas de sandía demostró que es posible remover plomo obteniendo

resultados favorables para la remoción de Pb(II), demostrando que es posible remover el metal pesado de una forma ecológica (Akkaya, 2013).

(4) *Osmosis inversa*. Es un proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

(5) *Nanofiltración*. La nanofiltración es un proceso de filtración de membrana que se utiliza con aguas de bajos sólidos disueltos totales. El propósito es suavizar el agua y desinfectar mediante la eliminación de la materia orgánica natural y materia orgánica sintética. La principal diferencia entre los sistemas de ósmosis inversa y la nanofiltración es que la membrana no es tan cerrada y funciona a una presión de agua de alimentación inferior. En una investigación realizada por Jie Gao et al. en el año 2013, encontró la capacidad de remoción de plomo (II) en una membrana de polietileno por el método de nanofiltración; obteniendo resultados de 91% remoción de Pb(II). (Gao, 2013)

(6) *Adsorción*. La adsorción es un método donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua, uniéndose a la superficie del sólido mediante fuerzas físicas (fuerzas electroestáticas o de Van der Waals). Se han estudiado diferentes sólidos con alta capacidad de adsorción de plomo como carbón activado, Zeolitas naturales, Zeolitas sintéticas, vidrios volcánicos, entre otros. La adsorción se ha vuelto un tratamiento muy atractivo para la remoción de metales pesado debido a su facilidad de operación, facilidad de costos, grandes capacidades de remoción, capacidad de regenerar adsorbentes para un uso futuro y posibilidad de pre-tratado de adsorbentes para obtener mayores capacidades de remoción.

En la Tabla II, se muestran las ventajas y desventajas de los principales métodos fisicoquímicos para separar metales pesados como el plomo en una solución de agua.

Tabla II. Ventajas y desventajas de los principales métodos de remoción de plomo en agua.

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidad de operación.</li> <li>• Alto nivel de eliminación de metales pesados.</li> <li>• Bajo costo de operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es selectivo.</li> <li>• Generación de lodos con alto costo de tratamiento.</li> </ul>
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible la eliminación de metales a muy bajas concentraciones.</li> <li>• Presentan alta selectividad.</li> <li>• Es posible recuperar los metales por electrolisis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posible competencia entre metales pesados y otros cationes.</li> <li>• Las resinas no son muy tolerantes al cambio de pH.</li> <li>• La solución debe de ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión.</li> </ul>
Ósmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos niveles de remoción.</li> <li>• Es un proceso automatizado.</li> <li>• La recuperación del metal pesado es posible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediana selectividad y tolerancia a cambios de pH.</li> <li>• Requiere muy alta presión para su funcionamiento.</li> <li>• Requiere frecuentemente de mantenimiento para evitar la saturación de la membrana.</li> <li>• Es necesario separar las partículas insolubles o en suspensión.</li> </ul>
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente efectivo a muy bajas concentración de metal.</li> <li>• Fácil de operar.</li> <li>• Permite la fijación de metales en presencia de otros cationes.</li> <li>• La recuperación de metales pesados es posible.</li> <li>• El adsorbente puede ser regenerado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo del adsorbente y su regeneración pueden ser muy altos.</li> <li>• Es necesario eliminar los materiales en suspensión antes de que la solución sea tratada.</li> </ul>

(Reyes, 2006)

### III.4 Adsorción

Los datos de adsorción usualmente se discuten y explican con las isothermas de adsorción. Entre las isothermas de adsorción se encuentran la isoterma lineal, isoterma de Freundlich, isoterma de Langmuir, isoterma de Temkin, isoterma de Gibbs y el modelo de BET. En las cuales los modelos de Langmuir y Freundlich son los más sobresalientes para los fenómenos de adsorción en Zeolitas naturales y pre-tratadas (Tchobanoglous et al. 1991).

#### III.4.1 Modelo de Langmuir

El modelo de Langmuir se basa en la hipótesis de que todos los centros activos de adsorción son equivalentes y que la capacidad de una molécula para unirse a la superficie es independiente de si hay o no posiciones próximas ocupadas. Además, la adsorción se restringe a una monocapa y no existen interacciones laterales entre las moléculas del adsorbato. La isoterma está representada por la ecuación:

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$q_e = \frac{V}{m} (C_0 - C_e) \text{ mg/g} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde  $q_e$  es una unidad de masa del adsorbato entre la masa del adsorbente en el equilibrio (mg/g),  $q_{\max}$  y  $b$  son constantes de Langmuir, relacionadas con la capacidad máxima de adsorción y energía de adsorción, respectivamente.  $C_0$  y  $C_e$  son la concentración inicial y en el equilibrio, respectivamente (mg/L),  $V$  es el volumen de la solución (L) y  $m$  es la masa de adsorbente usado (g).

La ecuación (1) en forma lineal tiene la forma:

$$q_e = \frac{1}{q_{\max}} + \frac{1}{bq_{\max}} \frac{1}{C_e} \quad \text{Ec. (3)}$$

La ecuación (3) se utiliza para analizar los datos en el equilibrio trazando  $1/q_e$  contra  $1/C_e$ , obteniendo una línea recta si los datos se ajustan a la isoterma de Langmuir.

#### III.4.2 Modelo de Freundlich

En la isoterma de Freundlich se asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. También en esta isoterma se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que en esta isoterma no hay un recubrimiento límite exacto ni se propone una adsorción de monocapa, sino multicapa. Se define por la ecuación:

$$q_e = KC_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde K es la constante de Freundlich, relacionada con la capacidad de adsorción y  $1/n$  es la intensidad de adsorción.  $C_e$  y  $q_e$  son iguales a las descritas en la isoterma de Langmuir.

La forma lineal del modelo de Freundlich que corresponde a la ecuación (5), la cual es expresada en forma logarítmica de la siguiente manera:

$$\text{Log}(q_e) = \text{Log}(K) + \frac{1}{n} \text{Log}(C_e) \quad \text{Ec. (5)}$$

Graficando  $\text{Log}(q_e)$  contra  $\text{Log}(C_e)$  se obtiene una línea recta cuando esta se ajusta a una isoterma de Freundlich (Lazo, 2008).

### **III.5 Zeolitas**

Las zeolitas son un conjunto de minerales del grupo de los aluminosilicatos hidratados que pueden contar con metales alcalinos y alcalinotérreos en alguno de los sitios de su estructura cristalina. El nombre de este grupo de minerales se deriva del griego “zein” y “lithos” que significa piedra que hierve. Su origen puede derivarse de múltiples materiales, siendo algunos precursores los vidrios volcánicos, los aluminosilicatos e incluso otras zeolitas (Mendoza, 2013).

En la actualidad existe una gran cantidad de zeolitas, 200 tipos aproximadamente (Karge, 1998); sin embargo, solo 41 corresponden a Zeolitas naturales (Mejer, 1996) como la Clinoptilolita, Mordenita, Chabazita, Philipsita, Epistilbita, Analcima y Laumontita, son de las Zeolitas naturales más comunes. En México los principales yacimientos de zeolitas se encuentran en los estados de: Oaxaca, San Luís Potosí, Puebla, Guanajuato y Sonora (Cochemé, 1996).

De acuerdo a Breek (1974), las principales características físicas y químicas de las zeolitas son: alto grado de hidratación, baja densidad, estructura cristalina estable, características de intercambio de iones, tamaño de poros uniformes, capacidad de adsorber gases y vapores, y catalizadores.

Actualmente las zeolitas están siendo utilizadas para: tratamiento de efluentes industriales, separación de gases, catalizador en el craqueo del petróleo y remoción de metales de efluentes nucleares, mineros e industriales. Estudios previos han demostrado que las Zeolitas naturales (Clinoptilolita, Mordenita, Chabazita) son utilizadas para reducir la contaminación ambiental creada por las aguas residuales industriales y urbanas, el proceso de reducción de la dureza del agua, el mejoramiento de la productividad agrícola como fertilizantes, entre otras (Ostroumov, 2002).

En la Tabla III, se muestra la fórmula de la estructura de algunas zeolitas naturales más importantes y más utilizadas en el proceso de adsorción y remoción de metales pesados (Wang and Peng, 2010).

Tabla III. Estructura de algunas zeolitas naturales.

<b>Zeolita</b>	<b>Estructura</b>
Clinoptilolita	$(\text{Na}_4\text{K}_4)(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Mordenita	$\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Chabazita	$(\text{Na}_2\text{Ca})_6(\text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_{72}) \cdot 40\text{H}_2\text{O}$
Philipsita	$(\text{Na}_2\text{K})_{10}(\text{Al}_{10}\text{Si}_{22}\text{O}_{62}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
Analcima	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$

(SMENET, 2006)

La Chabazita es una de las 41 zeolitas naturales que han sido identificadas; cuenta con una gran pureza y disponibilidad como para considerarse fuente natural explotable en varias minas de Estados Unidos, Japón, Italia, Bulgaria, Cuba, Yugoslavia, Alemania, Corea y México (Bosch y Shifter, 2003). La Chabazita es una de las primeras zeolitas en ser ampliamente estudiada por sus aplicaciones industriales, tecnológicas y por su capacidad para remover cationes metálicos como el Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo, Cromo, Zinc, Arsénico, Amonio y cationes radiactivos de soluciones acuosas (Pansini, Zamzow y Murphy 1992). Cationes los cuales pueden ser adsorbidos en los canales subnanométricos presentes en la estructura cristalina de una zeolita natural.

En la Figura 2, se muestra un ejemplo de la estructura cristalina de una zeolita natural del tipo Chabazita, donde se aprecian los canales subnanométricos y uniones características de una zeolita natural.

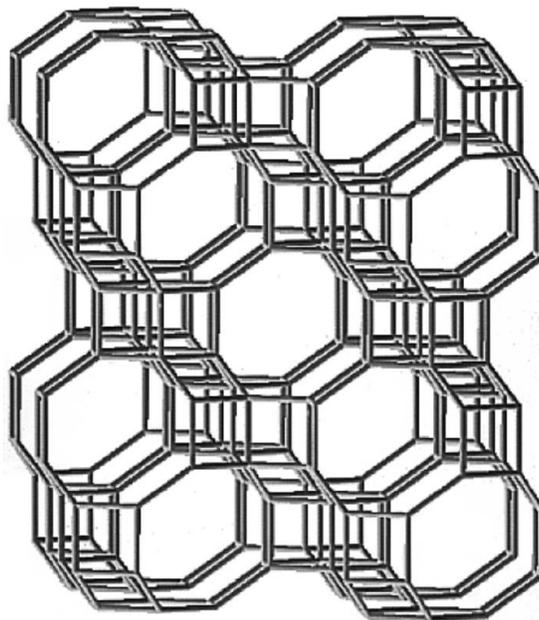


Figura 2. Estructura cristalina de una zeolita Natural tipo Chabazita (SMENET, 2006).

Investigaciones previas, como es el caso de Mejía et. al. en el año 2009, realizaron un estudio sobre las propiedades y características de una zeolita natural tipo Chabazita de la misma proveniencia que la zeolita utilizada en este proyecto, la cual fue llevada bajo las mismas condiciones de pre-tratamiento de MgO; dicha investigación incluye los resultados de: Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) antes y después del pre-tratamiento, Análisis de Difracción de Rayos X y Análisis de Potencial Z. (Mejía, 2009).

### **III.5.3 Adsorción de Plomo con Zeolitas**

Un estudio realizado en la India el año 2015, utilizó una zeolita sódica con estructura  $\text{Na}_{81}(\text{AlO}_2)_{81}(\text{SiO}_2)_{111}$  para la remoción de Pb(II) en una solución acuosa; los resultados mostraron que dicha zeolita es un adsorbente prometedor para la remoción de Plomo en soluciones acuosas, alcanzando hasta 87% de remoción (Pandey 2015).

En el año 2013 en Hermosillo, Sonora; se desarrolló una evaluación de una Chabazita natural mexicana para determinar la capacidad de remoción de plomo en agua; se comparó la capacidad de remoción de plomo en una solución acuosa de acetato de plomo usando una zeolita natural y dos pre-tratadas; una con hidróxido de sodio (NaOH) y otra con nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Finalmente, las tres zeolitas presentaron una gran capacidad de adsorción de hasta 2.38  $\text{m}_{\text{eq}}\text{Pb/g}$ ; sin embargo, las pre-tratadas obtuvieron capacidades de remoción superiores a la natural (Alvarado 2013).

De igual forma, en el año de 2014; se realizó un estudio sobre la incorporación de plomo en una zeolita Chabazita pre-tratada; la cual utilizó como adsorbato una solución de acetato de plomo y como adsorbente una zeolita pre-tratada con cloruro de amonio; demostró que un proceso de pre-tratamiento, puede mejorar significativamente la capacidad de remoción aumentando de 81 a 91% (Mendoza, 2014).

Por otra parte, realizando estudios sobre los parámetros de adsorción, en el año de 2011, en Serbia; se realizó una investigación acerca del efecto que tienen los parámetros de adsorción en la remoción de plomo de una solución acuosa utilizando una zeolita natural y una pre-tratada con Fe (III); la cual presentó desempeño en remoción, alcanzando valores de hasta 91%; de igual forma, se encontró que los parámetros de adsorción como el tiempo de contacto, temperatura, concentración inicial tienen un efecto significativo en la capacidad de remoción de plomo (Kragovic, 2011).

Continuando con el efecto de los parámetros de adsorción, una investigación realizada en Tailandia en el año 2008, utilizó una Clinoptilolita para remover plomo de una solución acuosa; encontrando que la concentración inicial de Plomo tiene un efecto significativo en el proceso de adsorción. Los valores fueron variando desde 100 hasta 1200 mg/L  $[Pb]_0$  en el proceso de adsorción teniendo un efecto significativo de 98% de remoción en las soluciones de concentración más baja de 100 y 300 mg/L  $Pb]_0$  (Achanai, 2008).

Las Zeolitas naturales y pre-tratadas han sido reconocidas como buenos adsorbentes de metales pesados para soluciones acuosas; sin embargo, la capacidad de remoción y eficiencia de remoción siempre están relacionados con el tipo de Zeolita utilizada como adsorbente, los parámetros de adsorción y el pre-tratamiento previo a la adsorción de la Zeolita (Curi, 2006).

En la Figura 3, se muestra una gráfica comparativa entre diferentes tipos de zeolitas naturales y pre-tratadas con su porcentaje de remoción donde se observa; las capacidades de remoción promedio superiores al 90% para las zeolitas que han llevado a cabo un proceso de pre-tratamiento; el porcentaje de remoción mostrado en la gráfica representa al mayor porcentaje obtenido con las condiciones de adsorción más favorables de cada investigación.

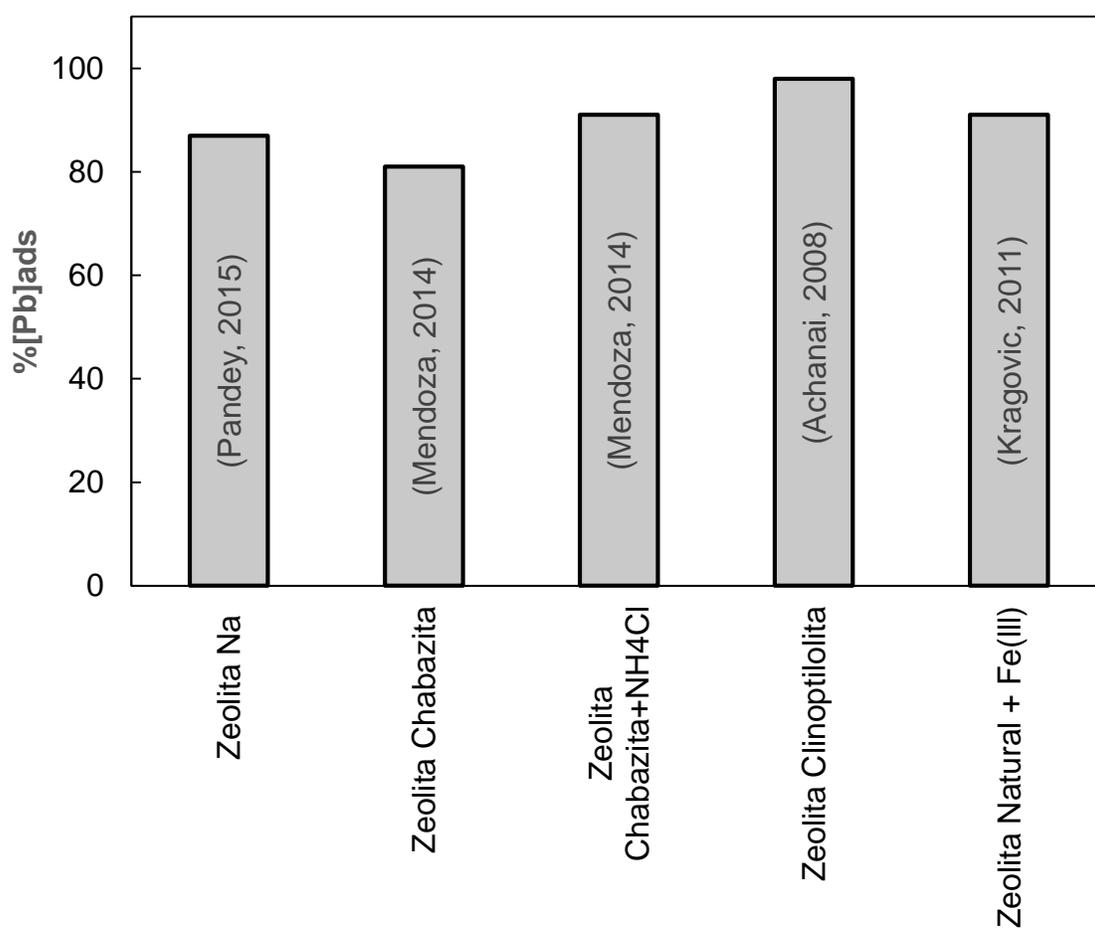


Figura 3. Gráfica comparativa de porcentajes de remoción de plomo contra tipo de zeolita.

## IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### IV.1 Materiales y equipo

Todos los productos químicos utilizados son grado reactivo marca J.T. Baker, las soluciones se prepararon con agua desionizada. Las muestras de plomo fueron preparadas con Pb(II) de un estándar con una matriz de 2-5% de ácido nítrico y concentración de 1000 mg/L. Las soluciones se analizaron por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), con un equipo Perkin Elmer Analyst 400 por el método de Flama con longitud de onda de 217nm, basándonos en el método de prueba establecido en la NOM-117-SSA1-1994. Para las pruebas de adsorción se utilizó una zeolita natural Chabazita ( $\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ).

### IV.2 Sitio de muestreo

En la Figura 4, se observa el sitio de muestreo de zeolita; proveniente del depósito La Palma, Municipio de Divisaderos, Sonora, México, las coordenadas son, 29° 36' de latitud norte y el meridiano 109° 28' de longitud al oeste (INEGI, 2001).

El muestreo realizado fue del tipo aleatorio, tomando muestras representativas de todo el sitio y obtener una muestra global de zeolita del depósito.

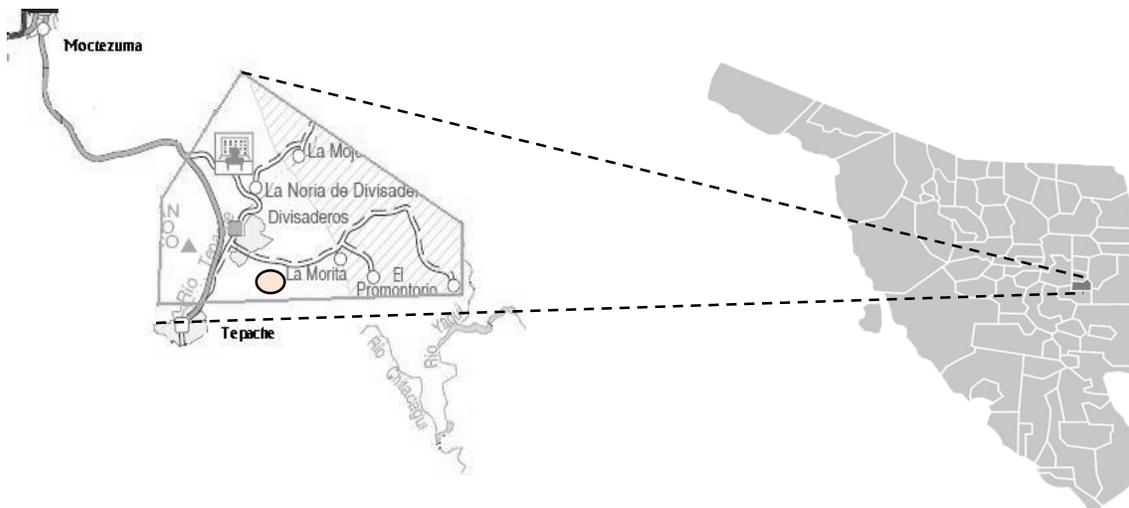


Figura 4. Localización del sitio de muestreo en Divisaderos, Sonora, México. (Inafed, 2004)

### **IV.3 Desarrollo experimental**

#### **IV.3.1 Proceso de trituración**

Primeramente, se redujo de tamaño la zeolita con una quebradora de quijada, marca Leland Faraday de 170 X 135 mm y 5HP, seguido por una quebradora de cono de cabeza corta, marca Canadian General Electric, de 222 mm y 1HP. Finalmente, la muestra se pulverizó con una pulverizadora de anillos concéntricos marca Canadian General Electric de 0.75HP. El producto se tamizó en una cribadora rotatoria portátil Rx-24; 80% paso la malla #40 (0.424 mm) y 60% quedó en la malla #60 (0.24 mm).

### IV.3.2 Pre-tratamiento con MgO

El pre-tratamiento de la zeolita natural (ZSP) con óxido de magnesio (MgO) se basó principalmente siguiendo la metodología de Mejía et al. (2009) la cual consistió en preparar una solución de ácido clorhídrico (HCl) 2M; a dicha solución se le agregó MgO hasta el punto en que la mezcla de ácido clorhídrico dejó de reaccionar con el MgO y comenzó a presentar sedimentos. La solución resultante se separó del exceso de MgO por el método de decantación y se utilizó para realizar el pre-tratamiento de la zeolita pre-tratada con óxido de magnesio (ZPO); el cual consistió en poner en contacto 40 g de ZSP con 1 L de solución de HCl y MgO en un matraz Erlenmeyer de 1 L. Al poner en contacto la solución con la ZSP se ajustó a pH= 9 utilizando NaOH 1 M. La mezcla se mantuvo en contacto con agitación magnética por 20 horas a 200 rpm. Después de cumplir las 20 horas en agitación, se filtró la mezcla con papel filtro Whatman #41 para posteriormente secar la muestra en una mufla marca Felisa con modelo FE-340 a 110 °C por un periodo de 8 horas para obtener la ZPO. En la Figura 5, se muestra el diagrama experimental del proceso de pre-tratamiento con óxido de magnesio.

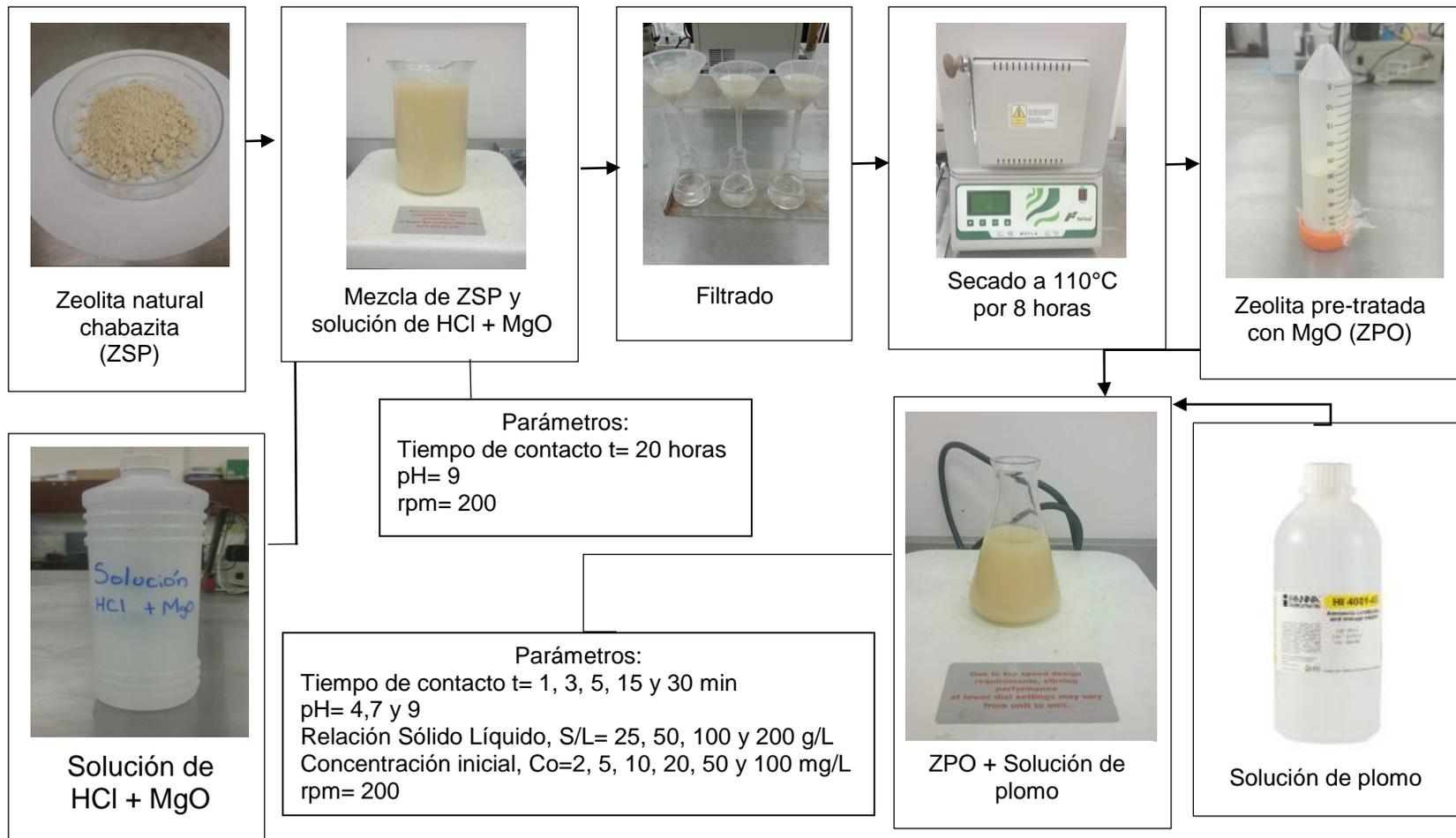


Figura 5. Proceso de pre-tratamiento con óxido de magnesio para una zeolita natural Chabazita.

### IV.3.3 Preparación de soluciones

Se utilizó un estándar de Pb(II) marca Accutrace con concentración inicial de 1000 mg/L (ppm) con una matriz de ácido nítrico del 2-5%, con el cual se prepararon disoluciones con concentraciones de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 mg/L. Se utilizó la Ecuación (6) para hacer los cálculos de dilución encontrar los valores de volumen a utilizar:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad \text{Ec. (6)}$$

### IV.4 Pruebas de adsorción

Se utilizaron matraces Erlenmeyer de 250 mL poniendo en contacto la zeolita natural y pre-tratada con un contenido en peso de 1.25, 2.5, 5 y 10 g respectivamente, con 50 mL de solución de Pb(II) a concentraciones de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 mg/L, manteniéndose agitada la muestra por tiempos de 1, 3, 5, 15 y 30 min; ajustando el valor de pH en valores de 4, 7 y 9 utilizando soluciones de HNO<sub>3</sub> 1 M y NaOH 1 M. Todos los parámetros y pruebas de adsorción utilizados se muestran en la Tabla IV. Las muestras se filtraron con papel filtro Whatman #41 y en la solución filtrada se analizó el plomo por espectrofotometría de absorción atómica por el método de flama.

Tabla IV. Parámetros utilizados en las pruebas de adsorción.

Muestra	Zeolita	Tiempo (min)	pH	Relación S/L (g/L)	Pb Inicial (mg/L)
PM1	ZPO	1	7	100	10
PM2	ZPO	3	7	100	10
PM3	ZPO	5	7	100	10
PM4	ZPO	15	7	100	10
PM5	ZPO	30	7	100	10
PM6	ZPO	5	4	100	10
PM7	ZPO	5	7	100	10
PM8	ZPO	5	9	100	10
PM18	ZPO	5	7	25	10
PM9	ZPO	5	7	50	10
PM10	ZPO	5	7	100	10
PM11	ZPO	5	7	200	10
PM12	ZPO	5	7	100	2
PM13	ZPO	5	7	100	5
PM14	ZPO	5	7	100	10
PM15	ZPO	5	7	100	20
PM16	ZPO	5	7	100	50
PM17	ZPO	5	7	100	100
PN1	ZSP	1	7	100	10
PN2	ZSP	3	7	100	10
PN3	ZSP	5	7	100	10
PN4	ZSP	15	7	100	10
PN5	ZSP	30	7	100	10
PN6	ZSP	5	7	100	2
PN7	ZSP	5	7	100	5
PN8	ZSP	5	7	100	10
PN9	ZSP	5	7	100	20
PN10	ZSP	5	7	100	50
PN11	ZSP	5	7	100	100

#### IV.5 Isotermas de adsorción

El análisis de las isotermas de adsorción se llevó a cabo a diferentes concentraciones iniciales de Pb(II) de 2, 5, 10 y 20 mg/L. La masa de adsorbente, zeolita pre-tratada, se mantuvo constante en 1 g durante el experimento. El volumen de solución de plomo se mantuvo constante en 50 mL. La agitación entre el adsorbente y la solución se mantuvo con agitación magnética a 200 rpm por un periodo de 24 horas a una temperatura ambiente de 25 °C.

En la Tabla V se muestran los parámetros utilizados para las isotermas de adsorción.

Tabla V. Parámetros utilizados en isotermas de adsorción.

Muestra	gramos de zeolita	Solución de Pb (mL)	Concentración inicial (mg/L)	Relación S/L	Tiempo (hrs)
IS1	1	50	2	20	24
IS2	1	50	5	20	24
IS3	1	50	10	20	24
IS4	1	50	20	20	24

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### V.1 Adsorción de Plomo

Ambas Zeolitas (ZSP y ZPO) presentan resultados muy favorables en la adsorción de plomo, sin embargo, ZPO sobresale con resultados de hasta 99% en remoción de plomo como se muestra en la Figura 6; el tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en el proceso de adsorción, esto es debido a que la cinética de adsorción es muy rápida, obteniendo valores de remoción superiores al 95 % y 97% desde el primer minuto de contacto para ZSP y ZPO respectivamente; finalmente apreciamos que a los 5 minutos de contacto se llega al equilibrio de adsorción para ambas zeolitas.

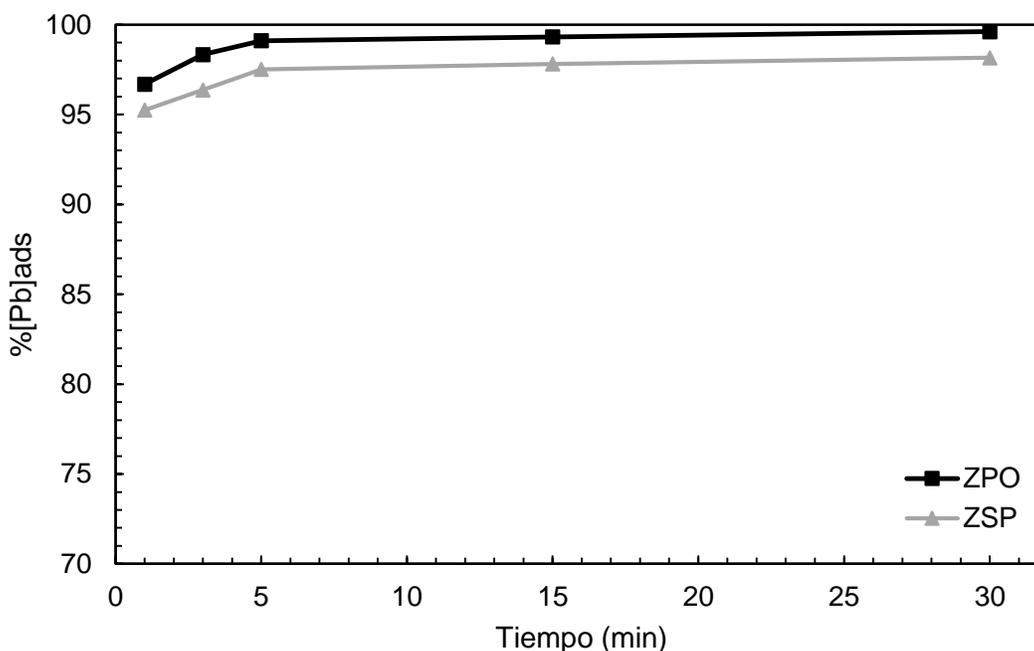


Figura 6. Efecto del tiempo de contacto con el porcentaje de Plomo adsorbido para la zeolita natural (ZSP) y la zeolita pre-tratada (ZPO).

Condiciones:  $[Pb]_0 = 10 \text{ mg/L}$ ; Relación S/L = 100 g/L, pH = 7 y  $T = 25^\circ\text{C}$ .

La Figura 7, muestra el efecto que tiene la concentración inicial de plomo con respecto al porcentaje de remoción; al incrementar las concentraciones iniciales de plomo obtenemos un efecto significativo, aumentando los porcentajes de remoción desde 96% hasta 99% para ZPO. También se puede apreciar que ZPO tiene una mayor capacidad de remoción de plomo comparada con ZSP, pues a medida que se aumenta la concentración inicial de plomo, ZPO se mantiene en valores superiores; ambas zeolitas, después de aumentar la concentración inicial a valores superiores de 20 mg/L muestran una tendencia a disminuir su capacidad de remoción de Plomo.

Se considera que el aumento en la concentración inicial ayuda al proceso de adsorción al existir mayor adsorbato para ser adsorbido; sin embargo, al exceder los 20 mg/L, el valor de remoción empieza a decaer por la saturación y disminución de sitios activos en la superficie de la zeolita.

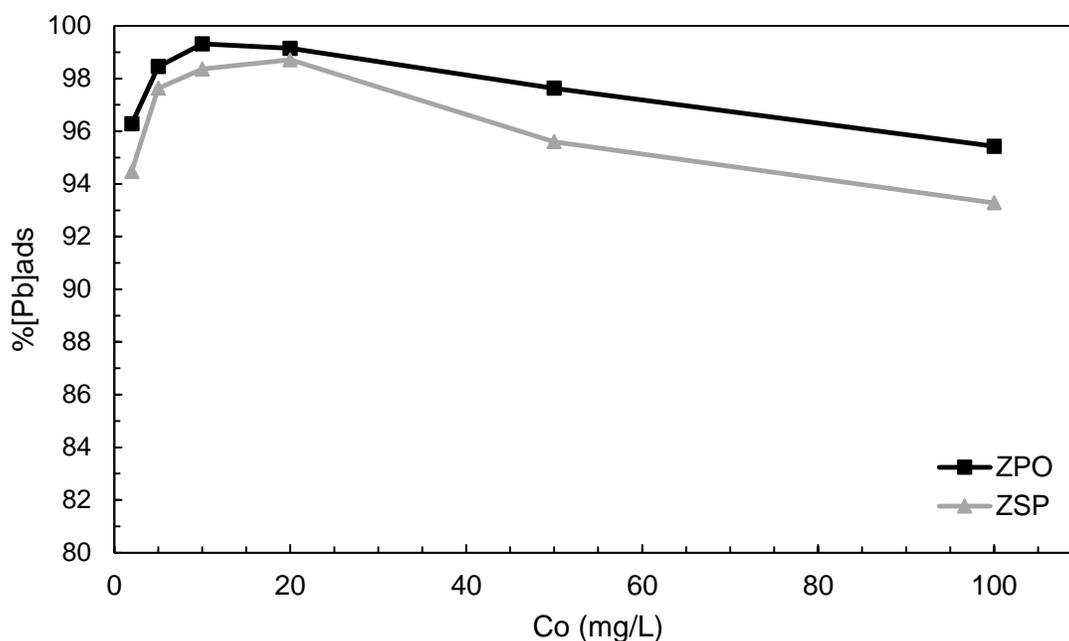


Figura 7. Efecto de las concentraciones iniciales en la adsorción de plomo para zeolita natural y pre-tratada.

Condiciones: Relación S/L = 100 g/L, pH = 7, T = 25°C y t = 5 min.

El efecto que tiene la relación sólido/líquido (S/L) con respecto a la adsorción se muestra en la Figura 8; se aprecia que al incrementar la relación sólido/líquido (S/L) desde 25 g/L hasta 200 g/L, la remoción de plomo aumenta sus porcentajes de hasta 99% para ZPO, esto se debe a que al incrementar la cantidad de adsorbente el valor de la relación (S/L) aumenta; lo cual representa una mayor cantidad de sitios activos del adsorbente y por lo tanto aumenta la remoción de plomo.

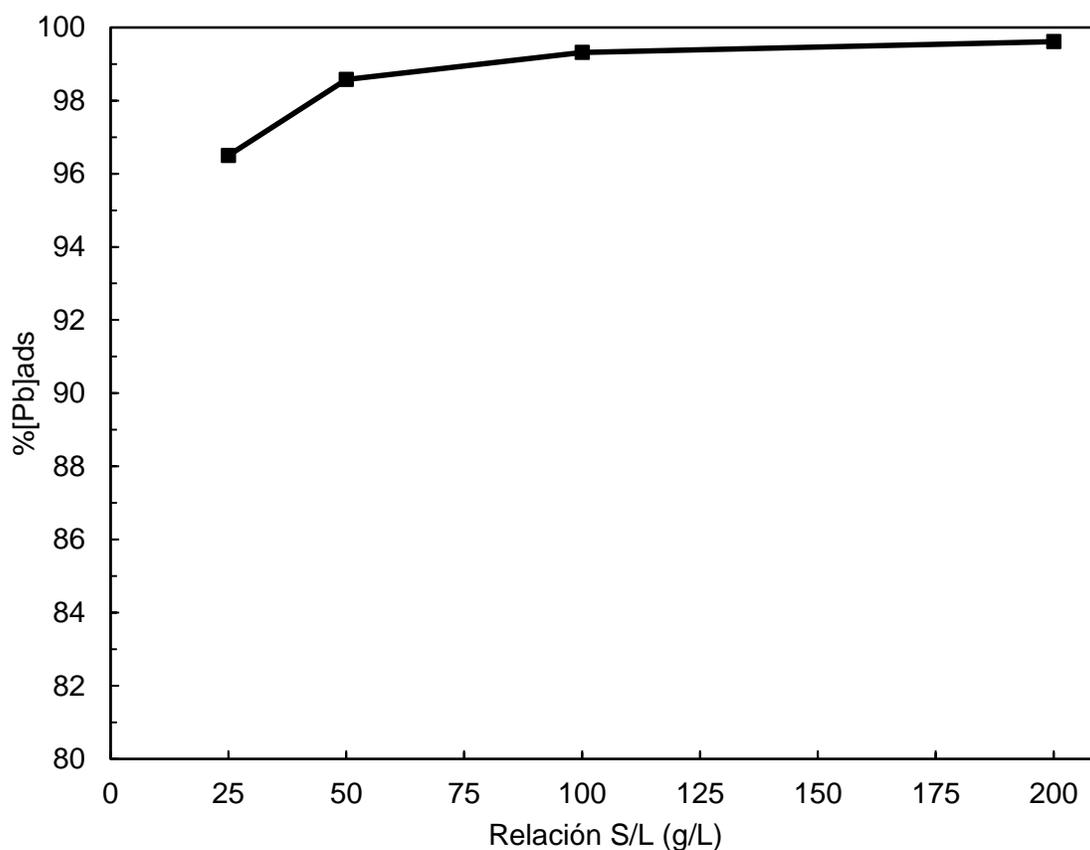


Figura 8. Efecto de la relación sólido/líquido en la adsorción de plomo para ZPO. Condiciones:  $[Pb]_0 = 10 \text{ mg/L}$ ;  $pH = 7$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $t = 5 \text{ min}$ .

La Figura 9, muestra el efecto que tiene el pH con respecto a la adsorción de plomo para ZPO; se observa que, al aumentar el pH los valores de porcentaje de remoción de Plomo varían mínimamente de 97 a 98%, por lo que se considera que el pH no tiene un efecto significativo en el proceso de adsorción de plomo.

En investigaciones previas, como es el caso de Mejía et al. en el año 2013, donde se estudió el comportamiento que tenía una zeolita natural chabazita pre-tratada adsorbiendo arsénico a diferentes valores de pH; en donde se determinó que el valor de pH= 9 es el que presenta mejores condiciones de adsorción.

Se puede apreciar que, en el caso de la adsorción de plomo, el pH presenta porcentajes de remoción muy similares para los valores de pH= 7 y pH= 9, comprobando así, que los mejores porcentajes de adsorción se obtienen entre dichos valores.

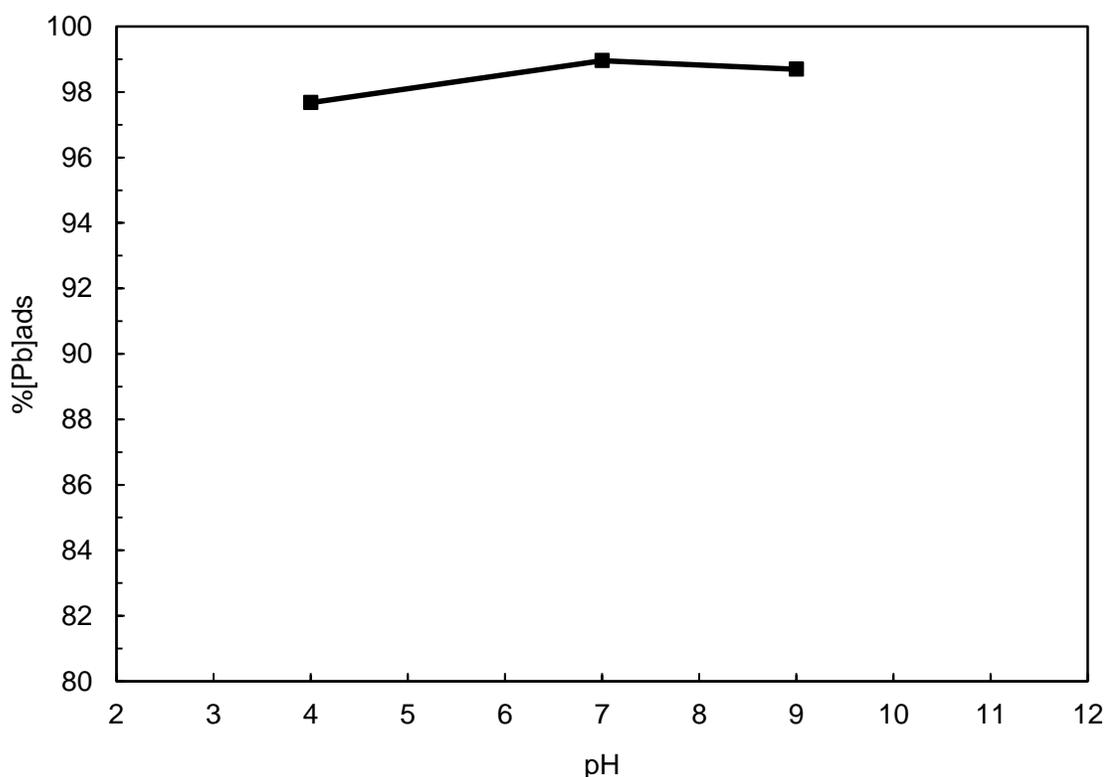


Figura 9. Efecto del pH en la adsorción de plomo para ZPO.

Condiciones:  $[Pb]_0 = 10 \text{ mg/L}$ ; Relación S/L = 100g/L,  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $t = 5 \text{ min}$ .

## V.2 Isotermas de adsorción para plomo en zeolita

En la Figura 10, se muestra las isotermas de adsorción linealizada por el método de Freundlich para ZPO, la cual está representada por la Ecuación (5).

En la gráfica se muestra un valor de regresión lineal  $R^2$  de 0.9394, una constante de Freundlich  $K$  de 3.3181 la cual está relacionada con la capacidad de adsorción, y un valor de  $1/n$  de 1.037. Valores menores o iguales a 1 de  $1/n$  están relacionados con un mecanismo de adsorción favorable y buena interacción entre adsorbato y adsorbente.

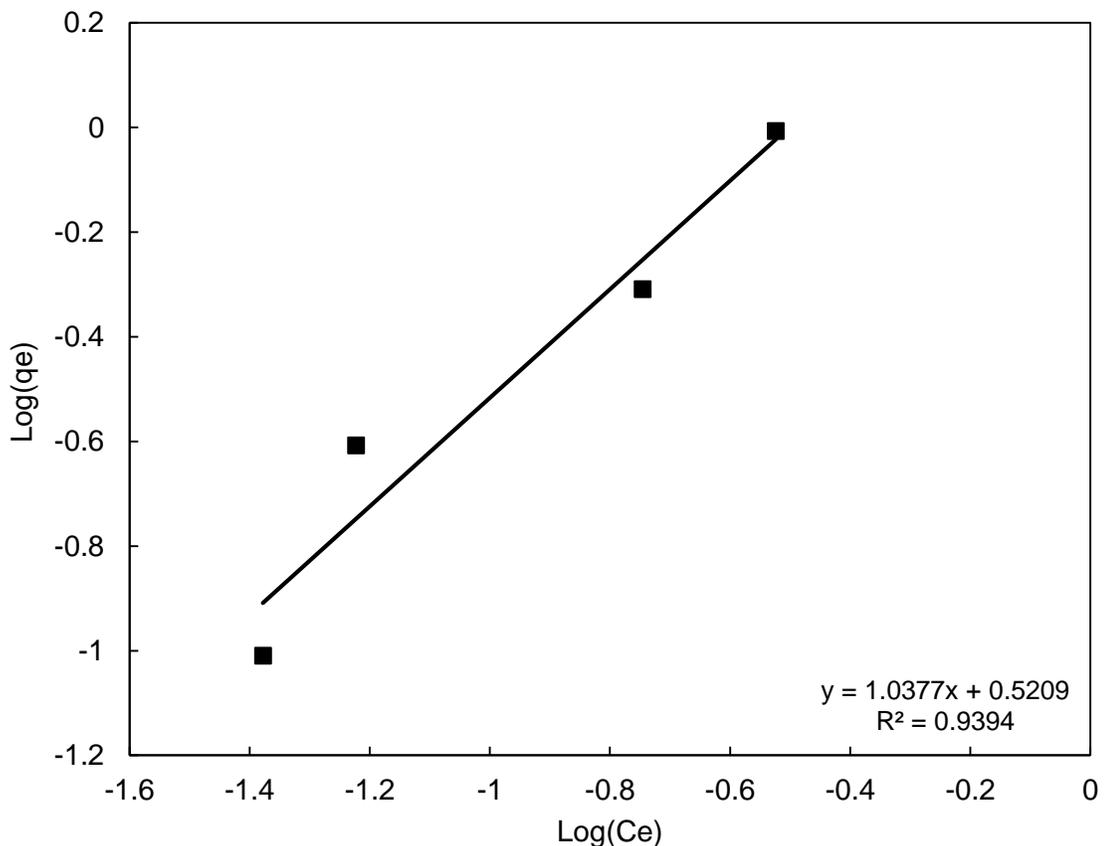


Figura 10. Isoterma de adsorción de Freundlich para ZPO.

Condiciones:  $t = 24$  hrs,  $pH = 7$ , Relación  $S/L = 20$  g/L y  $T = 25^\circ\text{C}$

En la Figura 11, se muestra la isoterma de adsorción linealizada por el método de Langmuir usando la Ecuación (3):

Se aprecia un valor de regresión lineal  $R^2$  de 0.8825 para ZPO, un valor de adsorción máxima  $q_{max}$  de 1.563 mg/g y una constante de Langmuir  $b$  de 1.5924 la cual es mayor cuanto más grande sea la energía de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente.

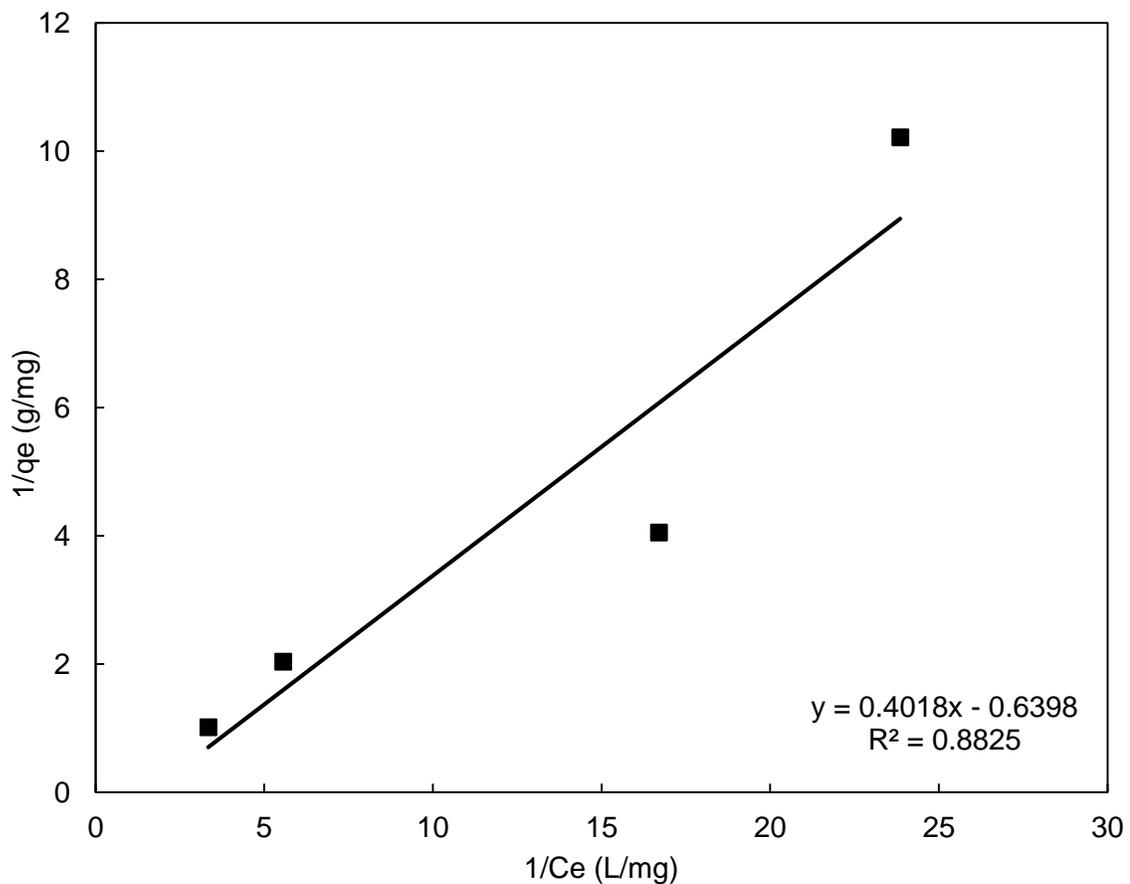


Figura 11. Isotherma de adsorción de Langmuir para ZPO.

Condiciones:  $t = 24$  hrs,  $pH = 7$ , Relación S/L = 20 g/L y  $T = 25^\circ C$

En la Tabla VI, se muestra los parámetros de los modelos de Langmuir y Freundlich con sus correspondientes coeficientes de adsorción para un tiempo de contacto de 24 horas. Los datos experimentales se ajustan de mejor forma a la Isoterma de Freundlich con un ajuste de regresión lineal  $R^2$  de 0.9394, una constante de Freundlich  $K$  de 3.3181 la cual está relacionada con la capacidad de adsorción y un valor de  $1/n$  de 1.0377 el cual está relacionado con el mecanismo de adsorción y la fuerza de unión entre el adsorbato y el adsorbente.

Tabla VI. Parámetros de los modelos de Langmuir, Freundlich y sus correspondientes coeficientes de correlación.

Adsorbente	Modelo de Langmuir			Modelo de Freundlich		
	b, L/mg	$q_{max}$ , mg/g	$R^2$	K, mg/g	1/n	$R^2$
Zeolita Pre-tratada	1.5924	1.5629	0.8825	<b>3.3181</b>	<b>1.0377</b>	<b>0.9394</b>

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VI.1 Conclusiones

- La zeolita natural es un buen adsorbente para la remoción de plomo en agua, obteniendo valores de remoción de 95% desde los primeros minutos de contacto.
- La zeolita pre-tratada con óxido de magnesio (ZPO) también es un buen adsorbente de plomo, se considera que el proceso de pre-tratamiento mejora el proceso de adsorción por la incorporación de MgO en los sitios activos de la superficie de ZPO, haciéndola mejor adsorbente que la zeolita natural (ZSP), alcanzando porcentajes de remoción de hasta 99%.
- La concentración inicial es el parámetro que presentan el mayor efecto en el porcentaje de remoción de plomo; al incrementar la concentración de 2 a 10 mg/L el porcentaje de remoción mejora de 92% a 99%; sin embargo, al sobrepasar una concentración inicial de 20 mg/L el porcentaje de remoción decae por la saturación de los sitios activos de adsorción.
- La relación (S/L) presenta un incremento en la remoción al variar en rangos de 25 g/L a 100 g/L, aumentando los porcentajes de remoción de 96% a 99%; esto se debe a que entre mayor sea la relación (S/L) existirá una mayor cantidad de sitios activos para la adsorción.
- Se considera que el tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en el proceso de remoción de plomo debido a que la cinética de adsorción es muy rápida; obteniendo porcentajes de remoción de hasta 97% desde el primer minuto de contacto.

- El pH no tiene un efecto significativo en el proceso de adsorción; variando mínimamente desde el valor de pH= 4 a pH= 9.
- Los datos experimentales de las isothermas de adsorción se ajustaron mejor al modelo de la isoterma de Freundlich, presentando un valor de capacidad de adsorción  $K$  de 3.3181 mg/g.

## **VI.2 Recomendaciones**

- Utilizar la zeolita pre-tratada con óxido de magnesio (ZPO) en una solución real de con Pb de un sitio contaminado con este metal.
- Llevar a cabo un estudio de adsorción utilizando la zeolita pre-tratada con óxido de magnesio (ZPO) en un sistema de flujo continuo para problemas reales de contaminación de plomo.
- Desarrollar un proceso de desorción de plomo del adsorbente para posteriormente reactivar la zeolita y reutilizarla; además de recuperar el plomo y darle un uso.
- Realizar un estudio para encontrar la capacidad de carga del plomo para la zeolita pre-tratada

## **VII. ANEXOS**

### **A. Tablas de resultados de adsorción**

### A.1 Tabla de resultados de adsorción.

Muestra	Trata- miento	Tiempo (min)	pH	Relación S/L (g/L)	Pb Inicial (mg/L)	Absorbancia (UA)	Pb inicial real (mg/L)	Absorbancia (UA)	$\sigma$	Co final (mg/L)	$\sigma$	% Final de Pb	$\sigma$	% Adsorbido	$\sigma$	Error
PM1	ZPO	1	7	100	10	0.18	10.26	0.0060	0.0028	0.34	0.14	3.31	1.37	96.69	1.37	±0.68
PM2	ZPO	3	7	100	10	0.18	10.26	0.0030	0.0000	0.17	0.01	1.66	0.13	98.34	0.13	±0.06
PM3	ZPO	5	7	100	10	0.19	10.75	0.0025	0.0015	0.09	0.08	0.89	0.79	99.11	0.79	±0.26
PM4	ZPO	15	7	100	10	0.19	10.25	0.0013	0.0006	0.07	0.04	0.68	0.42	99.32	0.42	±0.14
PM5	ZPO	30	7	100	10	0.19	10.75	0.0020	0.0012	0.04	0.07	0.39	0.68	99.61	0.68	±0.22
PM6	ZPO	5	4	100	10	0.19	10.75	0.0050	0.0031	0.26	0.22	2.32	2.01	97.68	2.01	±0.67
PM7	ZPO	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0020	0.0010	0.11	0.06	1.04	0.60	98.96	0.60	±0.20
PM8	ZPO	5	9	100	10	0.19	10.75	0.0016	0.0008	0.15	0.13	1.31	1.09	98.69	1.09	±0.36
PM22	ZPO	5	7	25	10	0.18	10.00	0.0080	0.0000	0.35	0.00	3.50	0.00	96.50	0.00	0
PM9	ZPO	5	7	50	10	0.18	10.25	0.0027	0.0006	0.15	0.04	1.42	0.42	98.58	0.42	±0.14
PM10	ZPO	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0013	0.0006	0.07	0.04	0.68	0.42	99.32	0.42	±0.14
PM11	ZPO	5	7	200	10	0.19	10.75	0.0020	0.0012	0.04	0.07	0.39	0.68	99.61	0.68	±0.22
PM12	ZPO	5	7	100	2	0.04	2.18	0.0025	0.0015	0.08	0.09	3.72	3.85	96.28	3.85	±1.28
PM13	ZPO	5	7	100	5	0.09	5.17	0.0017	0.0006	0.08	0.04	1.55	0.60	98.45	0.60	±0.20
PM14	ZPO	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0013	0.0006	0.07	0.04	0.68	0.42	99.32	0.42	±0.14
PM15	ZPO	5	7	100	20	0.37	20.81	0.0030	0.0026	0.18	0.16	0.85	0.75	99.15	0.75	±0.24
PM16	ZPO	5	7	100	50	0.09	49.83	0.0030	0.0000	1.18	0.00	2.3676	0.00	97.63	0.00	0
PM17	ZPO	5	7	100	100	0.17	99.53	0.0090	0.0000	4.55	0.00	4.5718	0.00	95.43	0.00	0
PM18	ZPO	5	7	50	2	0.04	2.18	0.0022	0.0013	0.11	0.09	4.91	3.57	95.09	3.57	±1.18
PM19	ZPO	5	7	200	2	0.04	2.18	0.0030	0.0017	0.11	0.09	4.77	4.17	95.23	4.17	±1.38
PM20	ZPO	5	4	100	2	0.04	2.18	0.0023	0.0012	0.12	0.07	5.54	2.86	94.46	2.86	±0.95
PM21	ZPO	5	9	100	2	0.04	2.18	0.0020	0.0012	0.06	0.06	2.87	2.62	97.13	2.62	±0.87

### Continuación A.1

Muestra	Tratamiento	Tiempo (min)	pH	Relación S/L (g/L)	Pb Inicial (mg/L)	Absorbancia (UA)	Pb inicial real (mg/L)	Absorbancia (UA)	$\sigma$	Co final (mg/L)	$\sigma$	% Final de Pb	$\sigma$	% Adsorbido	$\sigma$	Error
PN1	Natural	1	7	100	10	0.18	10.26	0.0085	0.0007	0.49	0.01	4.75	0.10	95.25	0.10	±0.05
PN2	Natural	3	7	100	10	0.18	10.26	0.0065	0.0007	0.37	0.02	3.62	0.16	96.38	0.16	±0.08
PN3	Natural	5	7	100	10	0.19	10.75	0.0037	0.0015	0.27	0.05	2.49	0.46	97.51	0.46	±0.15
PN4	Natural	15	7	100	10	0.18	10.25	0.0040	0.0010	0.22	0.07	2.18	0.71	97.82	0.71	±0.23
PN5	Natural	30	7	100	10	0.19	10.75	0.0050	0.0031	0.19	0.18	1.84	1.76	98.16	1.76	±0.58
PN6	Natural	5	4	100	10	0.19	10.75	0.0047	0.0006	0.26	0.05	2.42	0.57	97.58	0.57	±0.19
PN7	Natural	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0043	0.0012	0.24	0.08	2.36	0.75	97.64	0.75	±0.25
PN8	Natural	5	9	100	10	0.19	10.75	0.0045	0.0030	0.17	0.16	1.60	1.53	98.40	1.53	±0.50
PN9	Natural	5	7	50	10	0.18	10.25	0.0050	0.0010	0.28	0.07	2.74	0.73	97.26	0.73	±0.24
PN10	Natural	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0040	0.0010	0.22	0.07	2.18	0.71	97.82	0.71	±0.23
PN11	Natural	5	7	200	10	0.19	10.64	0.0030	0.0026	0.18	0.16	1.68	1.51	98.32	1.51	±0.50
PN12	Natural	5	7	100	2	0.04	2.18	0.0023	0.0012	0.12	0.07	5.53	2.85	94.47	2.85	±0.95
PN13	Natural	5	7	100	5	0.09	5.17	0.0023	0.0012	0.12	0.07	2.37	1.23	97.63	1.23	±0.40
PN14	Natural	5	7	100	10	0.18	10.25	0.0030	0.0020	0.17	0.13	1.64	1.22	98.36	1.22	±0.40
PN15	Natural	5	7	100	20	0.37	17.04	0.0040	0.0025	0.15	0.15	1.29	1.49	98.71	1.49	±0.49
PN16	Natural	5	7	100	50	0.09	49.83	0.0050	0.0000	2.19	0.00	4.397	0.00	95.60	0.00	0
PN17	Natural	5	7	100	100	0.17	99.53	0.0130	0.0000	6.69	0.00	6.717	0.00	93.28	0.00	0

**A.1.1** Tabla de resultados Figura 8

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Zeolita</b>	<b>%Adsorbido</b>
1	ZPO	96.69
3	ZPO	98.34
5	ZPO	99.11
15	ZPO	99.32
30	ZPO	99.61
1	ZSP	95.25
3	ZSP	96.38
5	ZSP	97.51
15	ZSP	97.82
30	ZSP	98.16

**A.1.2** Tabla de resultados Figura 9

<b>Zeolita</b>	<b>Pb inicial (mg/L)</b>	<b>%Adsorbido</b>
ZPO	2.18	96.28
ZPO	5.17	98.45
ZPO	10.25	99.32
ZPO	20.81	99.15
ZPO	49.83	97.63
ZPO	99.53	95.43
ZSP	2.18	94.47
ZSP	5.17	97.63
ZSP	10.25	98.36
ZSP	17.04	98.71
ZSP	49.83	95.60
ZSP	99.53	93.28

**A.1.3** Tabla de resultados Figura 10

<b>Relación S/L (g/L)</b>	<b>%Adsorbido</b>
25	96.50
50	98.58
100	99.32
200	99.61

**A.1.4** Tabla de resultados Figura 11

<b>pH</b>	<b>%Adsorbido</b>
4	97.68
7	98.96
9	98.69

## **VII. ANEXOS**

### **B. Tablas de resultados de Isothermas de Adsorción**

### B.1 Tabla de resultados para isotermas de adsorción

Isoterma	Masa de ZPO (g)	Concentración inicial de Pb (mg/L)	Masa inicial de Pb (mg)	Absorbancia	$\sigma$	Concentración final de Pb (mg/L)	$\sigma$	Masa final de Pb (mg)	$\sigma$
MgO1	1	2	0.1	0.0007	0.0006	0.042	0.035	0.0021	0.002
MgO2	1	5	0.25	0.001	0.0001	0.060	0.10	0.0030	0.005
MgO3	1	10	0.5	0.003	0.0020	0.180	0.18	0.0090	0.009
MgO4	1	20	1	0.005	0.0020	0.299	0.16	0.0150	0.008

$q_e$ (mg/g)	$\sigma$	Error	$\log(q_e)$	$\sigma$	Error	$C_e$ (mg/L)	$\sigma$	Error	$\text{Log}(C_e)$	$\sigma$	Error	$1/q_e$	$\sigma$	Error	$1/C_e$	$\sigma$	Error
0.10	0.002	0.001	-1.01	0.008	0.0025	0.042	0.031	0.010	-1.38	0.276	0.0919	10.21	0.18	0.059	23.86	12.41	4.14
0.25	0.005	0.002	-0.61	0.009	0.0031	0.060	0.104	0.035	-1.22	0.411	0.1369	4.05	0.09	0.029	16.70	6.18	2.06
0.49	0.009	0.003	-0.31	0.008	0.0026	0.180	0.180	0.060	-0.75	0.303	0.1009	2.04	0.04	0.012	5.57	2.78	0.93
0.99	0.008	0.003	-0.01	0.003	0.0012	0.299	0.158	0.053	-0.52	0.184	0.0613	1.02	0.01	0.003	3.34	1.33	0.44

**B.2.1** Tabla de resultados Figura 13

<b>log(qe)</b>	<b>Log(Ce)</b>
-1.01	-1.38
-0.61	-1.22
-0.31	-0.75
-0.01	-0.52

**B.2.2** Tabla de resultados Figura 14

<b>1/qe</b>	<b>1/Ce</b>
10.21	23.86
4.05	16.70
2.04	5.57
1.02	3.34

## BIBLIOGRAFIA

- Achanai H. et al. (2008). Use of Natural Clinoptilolite for the Removal of Lead (II) from Wastewater in Batch Experiment. *Center of Materials for Energy and Environment, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.*
- Adilson C. et al. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, CEP 35.400-000 Ouro Preto, MG-Brasil.*
- Akkaya G., Güzel F. (2013). Bioremoval and recovery of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solution by a novel biosorbent watermelon (*Citrullus lanatus*) seed hulls: Kinetic study, equilibrium isotherm, SEM and FTIR analysis, *Desalination and Water Treatment.*
- Al-Haj-Ali A., Al-Hunaidi T. (2004). Breakthrough curves and column design parameters for sorption of lead ions by natural zeolite, *Environmental Technology* 25, 1009–1019.
- Alvarado J. (2013). Evaluación de la potencialidad de una chabasita natural mexicana en la remoción de plomo en agua. *Universidad de Sonora. Sonora, México.*
- Baerlocher Ch., McCusker L., Olson D. (2007). Atlas of zeolite framework types. Structure Commission of the International Zeolite.
- Bosch P. y Shifter I. La zeolita: una piedra que hierve. 3a ed. Fondo de Cultura Económica, Distrito Federal, México, 82 pp (2003).
- Bosso S., Enzweiler J. (2002). Evaluation of heavy metal removal from aqueous solution onto scolecite. *Water Research* 36, 4795–4800..

- Brown R., McTigue N., Cornwell D. (2015). Water Research Foundation (WRF) advancing the science of water. *Controlling Lead in Drinking Water. American Water Works Association*, Washington, DC.
- Cincotti A., Mameli A., Locci A., Orru R., Cao G. (2006). Heavy metals uptake by Sardinian natural zeolites: Experiment and modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45, 1074–1084.
- Cochemé J., Lassauvagerie A, González-Sandoval J. (1996). Munch. Characterization and potential economic interest of authigenic zeolites in continental sediments from NW Mexico. *Mineralium Deposita*, Vol. 31 (6).
- Coombs D., Armbuster A. Report of the subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, *Commission on New Minerals and Mineral Names* (2001).
- Darwish A., Zewail T. et al. (2014). Investigation of the performance of a batch air spouting bed in conducting ion exchange reactions involving heavy metal removal. *Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Alexandria University*, PO Box, 21544 Alexandria, Egypt
- Djedidi Z., et al. (2009). Metals removal from soil, fly ash and sewage sludge leachates by precipitation and dewatering properties of the generated sludge. *Institut national de la recherche scientifique (Centre Eau, Terre et Environnement), Université du Québec*.
- Gao J., Shi-Peng S., Wen-Ping Z., Tai-Shung C. (2013). Polyethyleneimine (PEI) cross-linked P84 nanofiltration (NF) hollow fiber membranes for Pb(II) removal. *Department of Chemical & Biomolecular Engineering, National University of Singapore*, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore 119260, Singapore.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Censo General de Población y Vivienda 2000. México (2001). <http://www.inafed.gob.mx>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED) (2005). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Divisaderos. Sonora, Mexico

- International Agency for Research On Cancer (IARC) (2006). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *World health organization international agency for research on cancer lyon, france volume 87 Inorganic and Organic Lead Compounds*.
- Karge H., Weitkamp J. (1998). *Molecular Sieves-Science and Technology*, Vol. 1, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1998), p. 35.
- Kragović M., Daković A. (2011). Removal of lead from aqueous solutions by using natural and Fe (III)-modified zeolite. *Institute for Technology of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Franchet d'Esperey 86, 11000 Belgrade, Serbia*.
- Lazo J., Navarro A., Sun-Kou M., Llanos B. (2008). Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. *Sección Química, Departamento de Ciencias, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av.Universitaria 1801, Lima 32, Perú*.
- Llanes-Monter M., Olguin M., Solache-Rios M. (2007). Lead sorption by a Mexican clinoptilolite-rich tuff, *Environmental Science and Pollution Research* 14, 397–403.
- Mejer W. (1996) *Atlas of zeolite, Structure Types*, 4th revised edition, Elsevier 1996.
- Mejía F. et al. (2009). Adsorción de arsénico en zeolita natural pretratada con óxido de magnesio. *Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México. 83000*
- Mendoza A. (2013). Estudio sobre la incorporación y retención de plomo en zeolita natural. *Universidad de Sonora, Departamento de Geología. Sonora, Mexico*.
- Naseem R. y Tahir S. (2001). Removal of Pb (II) from aqueous/acidic solution by using Bentonite as an adsorbent. *Central Laboratory for*

*Environmental Analysis, Pakistan Environmental Protection Agency, Islambad, Pakistan.*

- Norma Oficial Mexicana (1994). NOM-117-SSA1-1994, Métodos de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrofotometría de absorción atómica.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (1994). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Ostroumov F., Ortiz L., Corona C.: Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. *Sociedad Mexicana de Mineralogía, México*, pp 1–6 (In Spanish) (2002):
- Oter O., Akcay H. (2007). Use of natural clinoptilolite to improve, water quality: sorption and selectivity studies of lead(II), copper(II), zinc(II), and nickel(II), *Water Environment Research* 79, 329–335.
- Pandey P., Sharma S, Sambhi S. (2010). Kinetics and equilibrium study of chromium adsorption on zeolite-NaX, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 7 (2) 395–404, doi:<http://dx.doi.org/10.1007/BF03326149>.
- Perry R. (2010). Manual del Ingeniero Químico. Volumen III. Capítulo 16. Adsorción e intercambio iónico.
- Peskov M. (2012). Chemistry of Zeolites, *Stockholm University. For Atomic Scale Design Network (ASDN) webpage*. Estocolmo, Suecia.
- Pragst F., et al. (2016). High concentrations of lead and barium in hair of the rural population caused by water pollution in the Thar Jath oilfields in South Sudan. *Institute of Legal Medicine, University Hospital Charité, Germany*.
- Ramirez A. (2005). El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*.

- Reyes E., Cerino F., Suarez A. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *UANL Facultad de ciencias químicas*.
- Reyna L. Ayala M. (2006). Determination de metales pesados traza en agua de pozo de Navojoa, Sonora. *Instituto Tecnológico de Sonora*.
- Sandoval L., Montellano L., Piña M. y Sánchez L. (2000). Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.
- SMENET, Elzea J., M. Barker J.(2006). Industrial Minerals & Rocks commodities, markets, and uses.
- Sprynskyy M., et al (2006). Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, and Cd<sup>2+</sup>) adsorption on clinoptilolite. *Journal of Colloid and Interface Science* 304, 21–28.
- Tchobanoglous G., Burton F. (1991). Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse, tercera edición, McGraw-Hill, New York.
- Trgo M., Peric J. y Vukojevic-Medvidovic N (2005). Investigations of different kinetic models for zinc by a natural zeolitic tuff. *Faculty of Chemical Technology, University of Split, Teslina 10/V, 21000 Split, Croatia*.
- Tschernich R.W (1992). Zeolites of the World. Geoscience Press, Phoenix, Arizona, EUA.
- U.S. Department of health and human services y Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2007). Toxicological profile for lead.
- USEPA, LCR-1991 (1991). Lead and Copper Rule 1991. *United States of America*.
- Wang S., Peng Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Department of Chemical Engineering, Curtin University of Technology, Australia*. I 156, 11–24.

- World Health Organization (WHO) (2010). Exposure to lead: a major public health concern. *World Health Organization*.
- Zeta Meter (2016). Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes. *Zeta-Meter Inc. Staunton, Virginia, United States of America*.
- Zvinowanda C., Okonkwo J., Shabalala P., Agyei N. (2009). A novel adsorbent for heavy metal remediation in aqueous environments. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 6 (3) 425–434,