

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA CON  
ZEOLITA NATURAL MEDIANTE SISTEMA BATCH Y LECHO  
EMPACADO**

POR:

**BRENDA MAGALLANES MIRANDA**

**TESIS, TESINA O ESTUDIO DE CASO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA  
OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**JULIO DE 2019**



Evaluación de la remoción de arsénico en agua con zeolita natural mediante sistema batch y lecho empacado. Tesis presentada por la alumna Brenda Magallanes Miranda como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

---

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

---

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador(a) Académico

---

**Dra. María de Lourdes Villalba**  
Director(a) de Tesis

**Julio 2019**

---

Fecha

Comité:

**D.C. María de Lourdes Villalba**  
**D.C. María Socorro Espino Valdés**  
**M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar**  
**Dr. Luis Humberto Colmenero Sujo**

© Derechos Reservados

**Brenda Magallanes Miranda**  
Circuito Número I, Nuevo  
Campus Universitario II, 31125  
Chihuahua, Chih. México

Julio 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

31 de julio de 2019

**ING. BRENDA MAGALLANES MIRANDA**

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. María de Lourdes Villalba** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA CON ZEOLITA NATURAL MEDIANTE SISTEMA BATCH Y LECHO EMPACADO”**.

#### **ÍNDICE**

**Introducción**

**Antecedentes**

**Zeolita**

**Justificación**

**Objetivos**

Objetivo general

Objetivos específicos

**Hipótesis**

**Metodología**

**Extracción**

Molienda

Tamizado

Lavado y secado de zeolita

**Caracterización**

Difracción de rayos x

Análisis de microscopía electrónica de barrido.

Petrografía

Preparación de solución de arsénico

Sistema batch

Columna de adsorción



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

**Resultados y discusiones**

**Conclusiones**

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
*"Naturam subiecit aliis"*

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UACH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

## Dedicatoria

*Esta tesis la dedico a mi querido hijo, Osmar. Por ser mi fuente de motivación e inspiración, y el mejor motor para levantarme cada día y superarme, luchando siempre para que la vida nos depare un mejor futuro. Este escrito es para demostrarte que cualquier cosa que desees, con mucha paciencia y dedicación, serás capaz de alcanzar todos tus sueños.*

*A mi esposo, Oscar, por tu sacrificio y esfuerzo durante mis estudios, por creer en mi capacidad, y aunque han existido momentos difíciles siempre has estado para brindarme tu comprensión, cariño y apoyo. Gracias por tomar las riendas de nuestro hogar durante esos días en los que el estudio y las clases ocuparon mi tiempo por completo. Hoy, ¡lo hemos logrado!*

*Para mis papas Luly y Arturo; y a mis hermanos Omar y Sebastián, quienes con sus palabras y aliento me animaban a seguir adelante y esforzándome, no solamente durante estos dos años, sino durante toda mi vida. Por enseñarme que los valores como el trabajo duro, la honestidad y la perseverancia son piezas clave para culminar los éxitos.*

*A mis compañeros de clases Karla, Cesar, Joaquín, Iván y Osvaldo, que siempre me mostraron su apoyo y compartieron sus conocimientos para hacer más llevadera la carga de estudiar una maestría. También a todos mis compañeros de semestres más avanzados, porque demostraron que definitivamente dos cabezas piensan mejor que una.*

*A mi amiga, Alejandra García, por ser mi mano derecha durante este tiempo, por la ayuda desinteresada y por aportar considerablemente a este proyecto. Te agradezco por la ayuda brindada y por los buenos momentos que hemos compartido.*

*Al doctor Ignacio Reyes por los buenos consejos y el apoyo desde mi educación de licenciatura hasta el día de hoy.*

*Y finalmente, a Dios, porque sé que no todo es una casualidad. Gracias por poner las piezas adecuadas y los escalones necesarios para alcanzar un éxito más.*

*Se perfectamente que la meta que hoy se alcanza, no solo ha sido mía... Gracias y muchas felicidades a ustedes también. ¡Dios multiplique sus bendiciones!*

## **Agradecimientos**

A mi directora de tesis, la D.C. María de Lourdes Villalba, por su generosidad, su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador. Gracias por tomar mis batallas como tuyas y apoyarme a pesar de cualquier cosa.

A mi asesora, tutora y maestra, la D.C. María Socorro Espino Valdés, por brindar desinteresadamente sus conocimientos y su experiencia dentro del campo laboral. Gracias por la calidez en sus palabras y por el apoyo incondicional brindando en todas las adversidades que se presentaron durante estos dos años. De todo corazón, ¡mil gracias!

A las instituciones que han hecho posible la realización de esta tesis: a la Universidad Autónoma de Chihuahua, por abrirme nuevamente las puertas para la realización de mi maestría; por la ayuda económica brindada al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México).



## Índice de Contenido

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Agradecimientos .....                                | viii                                  |
| Índice de Contenido .....                            | viii                                  |
| Índice de Tablas .....                               | ixi                                   |
| Índice de Figuras .....                              | xii                                   |
| Índice de Graficas .....                             | xiii                                  |
| INTRODUCCION .....                                   | <b>I;Error! Marcador no definido.</b> |
| ANTECEDENTES .....                                   | IX                                    |
| ZEOLITA .....  | X                                     |
| JUSTIFICACION .....                                  | XIII                                  |
| OBJETIVOS .....                                      | XIV                                   |
| OBJETIVOS GENERALES .....                            | XIV                                   |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS .....                          | XIV                                   |
| HIPOTESIS .....                                      | XV                                    |
| METODOLOGIA .....                                    | XVI                                   |
| RECOLECCION DE ZEOLITA NATURAL .....                 | XVI                                   |
| MOLIENDA .....                                       | XVIII                                 |
| TAMIZADO .....                                       | XVIII                                 |
| LAVADO Y SECADO DE ZEOLITA .....                     | XVI                                   |
| CARACTERIZACION .....                                | XXI                                   |
| DIFRACCION DE RAYOS X .....                          | XXI                                   |
| ANALISIS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO ..... | XXIII                                 |
| PETROGRAFIA .....                                    | XXIII                                 |
| PRERPARACION DE SOLUCION DE ARSENICO .....           | XXIV                                  |
| SISTEMA BATCH .....                                  | XXIV                                  |



|   |       |
|---|-------|
| MEDICION DE PH.....                           | XXV   |
| COLUMNA DE ADSORCION.....                     | XXVI  |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES.....                 | XXVII |
| ISOTERMAS DE ADSORCION DEL SISTEMA BATCH..... | XXX   |
| COLUMNA DE ADSORCION .....                    | XXX   |
| CONCLUSION.....                               | XLI   |
| Recomendación.....                            | XLII  |
| Referencias.....                              | XLVII |



## Índice de Tablas

|   |         |
|---|---------|
| Tabla 1: Datos de isotermas, sistema batch .....  | XXXI    |
| Tabla 2: Datos de isotermas, lecho empacado ..... | XXXVIII |



## Índice de Figuras

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Figura 1: Símbolo de sistema batch.....                                    | ¡Error! Marcador no definido.I |
| Figura 2: Filtración por columna de lecho empacado. ....                   | ¡Error! Marcador no definido.I |
| Figura 3: Tipos de poros.....  | III                            |
| Figura 4: Mecanismos de difusión.....                                      | III                            |
| Figura 5: Competencia y colaboración de partículas.....                    | IV                             |
| Figura 6: Proceso de adsorción.....  | V                              |
| Figura 7: Ubicación del Ejido "La Haciendita", Municipio de Chihuahua..... | XVI                            |
| Figura 8: Excavaciones del material zeolita.....                           | XVII                           |
| Figura 9: Trituración de la zeolita.....                                   | XVIII                          |
| Figura 10: Tamizado de la zeolita.....                                     | XIX                            |
| Figura 11: Material cribado malla #12 y #30.....                           | XX                             |
| Figura 12: Lavado de zeolita.....  | XXI                            |
| Figura 13: Equipo de Difracción de Rayos X.....                            | XXII                           |
| Figura 14: Análisis petrográfico.....                                      | XXIII                          |
| Figura 15: Sistema batch.....  | XXIV                           |
| Figura 16: Medición de pH.....   | XV                             |
| Figura 17: Lechos empacados.....   | XXVI                           |
| Figura 18: Difractograma de material zeolítico.....                        | XXVII                          |
| Figura 19: Muestra de mano.....  | XXVIII                         |



## Índice de Graficas

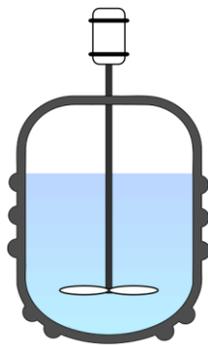
|   |                                      |        |
|---|--------------------------------------|--------|
| Grafico 1: Isoterma de Langmuir en sistema batch .....                | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> | XXXII  |
| Grafico 2: Isoterma de Freundlich en sistema batch .....              |                                      | XXXIII |
| Grafico 3: Tiempo v.s. pH, concentración 0.8 ppm.....                 |                                      | XXXIV  |
| Grafico 4: Tiempo v.s. pH, concentración 0.5 ppm.....                 |                                      | XXXV   |
| Grafico 5: Comportamiento de concentración v.s. tiempo (0.8 ppm)..... |                                      | XXXVI  |
| Grafico 6: Comportamiento de concentración v.s. tiempo (0.5 ppm)..... |                                      | XXXVI  |
| Grafico 7: Isoterma de Langmuir para columna.....                     |                                      | XXXIX  |
| Grafico 8: Isoterma de Freundlich para columna.....                   |                                      | XL     |



## 1. INTRODUCCION

Un sistema batch es una unidad diseñada para llevar a cabo una o varias reacciones químicas, este está constituido por un recipiente cerrado (Figura 1), el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas (Sendrós, 2004). Su modelo matemático consiste en un equilibrio de masa y balances de energía, que proporcionan un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que, en la mayoría de los casos, deben ser resueltos numéricamente (Caccavale, Iamarino, Pierri, & Tufano, 2011).

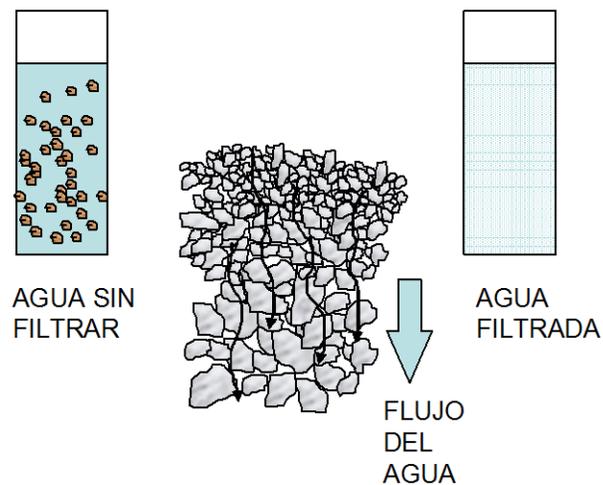
Existen dos sistemas batch, homogéneo y heterogéneo, el primero es aquel que presenta una sola fase y por tanto su composición es idéntica en cualquier parte del sistema, en cuanto al heterogéneo es aquel que requiere la presencia de dos o más fases para que la reacción se lleve a cabo. El diseño y la operación depende del tipo, tamaño, transferencia de masa y energía. Así como de las condiciones de operación que se requieren en base a la cantidad de volumen a tratar (Smith, 1991). Estos constituyen una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales y continúan adquiriendo importancia en la eliminación de contaminantes contribuyendo una excelente oportunidad de innovación debido a la flexibilidad de operación y su fácil automatización incluyendo un mínimo requerimiento de espacio, fácil manejo y posibilidad de realizar modificaciones durante el tratamiento (Muñoz y Ramos, 2014).



**Figura 1.** Símbolo de sistema batch (<https://www.wikiwand.com>)



En tanto que la filtración por columnas consiste en la remoción de partículas disueltas y suspendidas presentes en una solución acuosa que escurre a través de un medio poroso. Usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos complementarios: transporte y adsorción. Las partículas por remover son adheridas a la superficie del medio adsorbente o filtrante y estas permanecen resistiéndose a las fuerzas de escurrimiento (Elec, Para, & Micil, 2014). Al no existir agitación, el agua fluye uniformemente por el sólido y el contacto liquido-solido-gas (Figura 2) se realice a través de toda la columna de filtración (Cruz, 1999).



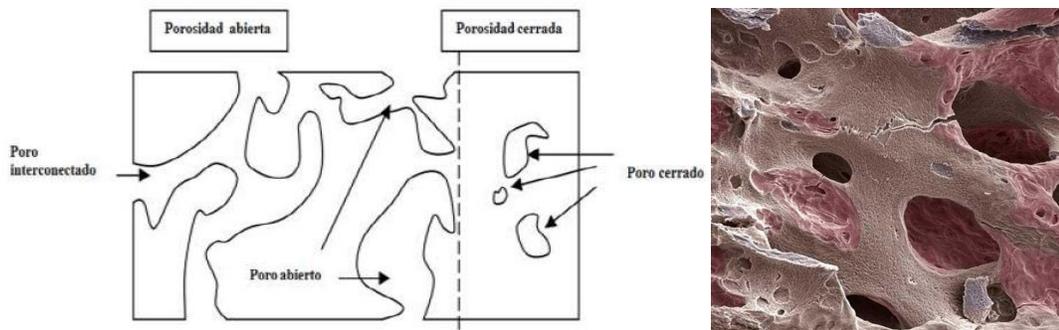
**Figura 2.** *Filtración por columna de lecho empacado*

Los parámetros que controlan la filtración por columnas son las características fisicoquímicas del material, el área de paso de flujo y el espesor del lecho. El tamaño de las columnas estará determinado principalmente por las necesidades de operación, ya que la absorción depende más de las características del agua y el medio granular utilizado que de la forma y el tamaño de la estructura en donde se realiza.



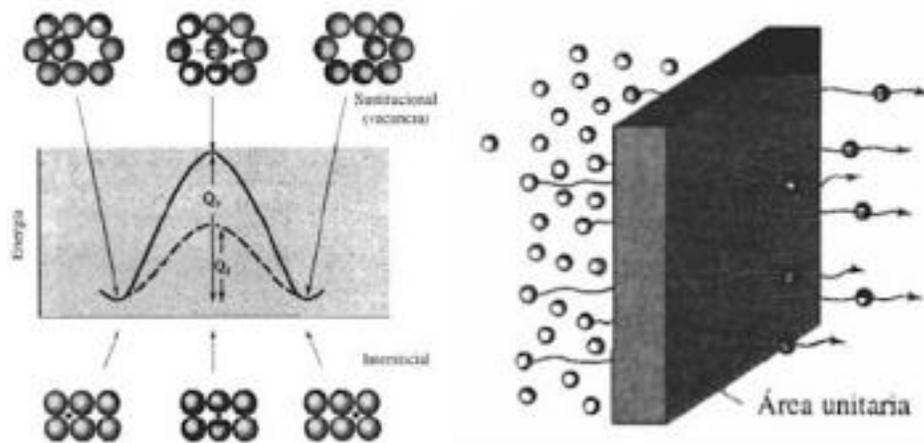
En el proceso de adsorción, las moléculas de adsorbato llegan desde afuera de partículas de adsorbente y se difunden dentro de las partículas para ocupar completamente los sitios de adsorción. Según Susuki (1990) este proceso depende de:

La estructura del adsorbente (Figura 3)



**Figura 3.** Tipos de poros

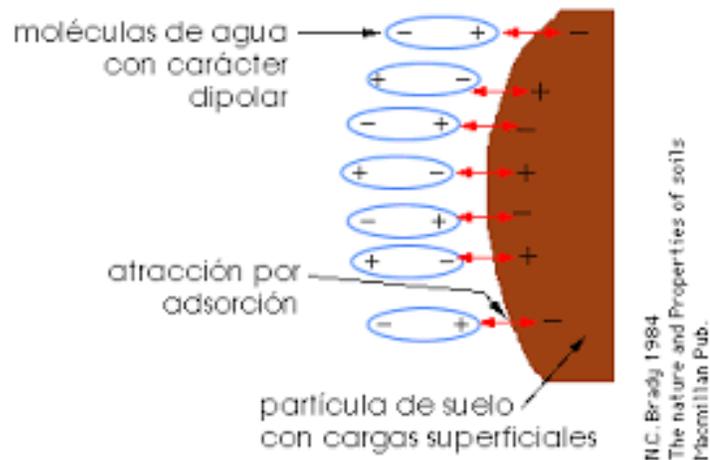
Diferentes mecanismos de difusión (Figura 4)



**Figura 4.** Mecanismos de difusión

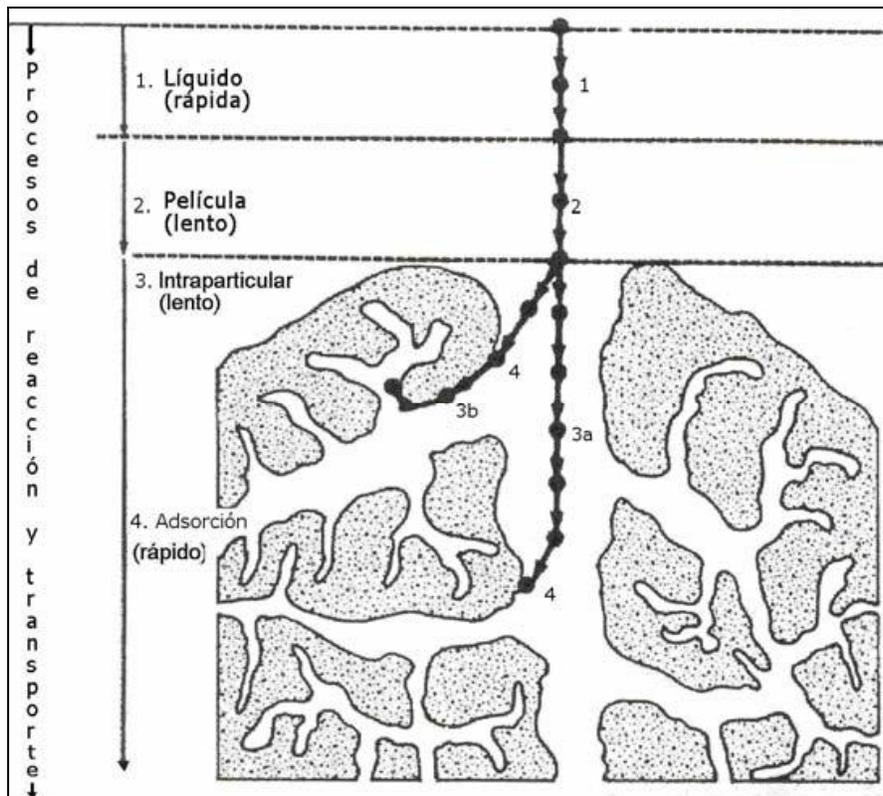


### Competencia y colaboración de las partículas (Figura 5)



**Figura 5.** Competencia y colaboración de las partículas.

En el proceso de adsorción se llevan a cabo diversos aspectos de gran interés como: (1) El transporte del adsorbato o soluto en la fase líquida, la cual suele ser demasiado rápido debido a la agitación, (2) el transporte a través de la película fija o capa superficial del líquido en el exterior del adsorbente (Difusión de Película), (3) difusión del adsorbato dentro de los poros del adsorbente (Difusión de Poro), o bien a lo largo de la superficie de las paredes del poro (Difusión Superficial). Existen dos resistencias a la transferencia: la externa en el líquido y la interna en la fase sólida (3a y 3b). (4) La adsorción del soluto en la superficie interna del adsorbente (Figura 6).



**Figura 6.** *Proceso de adsorción*

La transferencia de masa desde el líquido hacia la superficie del sólido está caracterizada por un coeficiente de transferencia de masa de película ( $k_f$ ) y la transferencia de masa desde la superficie del sólido hasta el interior de las partículas de adsorbente está caracterizado por el coeficiente de difusión intraparticular ( $D_s$ ). Ambos coeficientes deben ser conocidos si se desea diseñar una columna de lecho fijo (Cooney, 1999).

El estudio de la cinética de adsorción en sistemas tipo lote (Batch) es altamente relevante para los sistemas de adsorción de lecho fijo. Lo anterior se debe a que en un experimento de sorción tipo lote debidamente realizado, con el tamaño de grano que se utilizará en la columna, producirá datos que pueden ser analizados para obtener el valor del coeficiente  $D_s$ , el cual puede entonces ser utilizado para diseñar el sistema de lecho fijo. Por supuesto, existirá un valor del coeficiente  $k_f$  para el sistema tipo lote, pero éste, por lo general,



será diferente al valor de  $k_f$  para un sistema de lecho fijo. Por lo tanto, mientras que el análisis de los datos de cinética en lote da un valor de  $k_f$  para dicho sistema, éste no es apto para el diseño de un lecho fijo, solamente es útil para deducir el valor de  $D_s$  a partir de los datos experimentales de sistemas tipo lote (Cooney, 1999).

Actualmente, existen ciertos modelos matemáticos empíricos que se utilizan en la obtención de parámetros cinéticos que pueden ser útiles en cálculos de adsorción de contaminantes. Uno de ellos es el propuesto por Lagergren (1898), que consiste en una ecuación de *pseudo primer-orden* basada en una reacción superficial, la cual está representada por (Mathialagan y Viraraghavan, 2003):

$$q_t = q_e(1 - e^{(-K_L t)}) \quad (1)$$

donde:

$K_L$  = Constante de velocidad de adsorción de Lagergren ( $\text{h}^{-1}$ )

$q_e$  = Concentración del ion adsorbido en equilibrio (mg/g)

$q_t$  = Concentración del ion adsorbido en un tiempo dado t(mg/g)

Existe otra ecuación alternativa para describir la cinética de sorción que también incorpora una constante de tiempo; se trata de la ecuación de *Elovich*, desarrollada para los procesos de sorción heterogénea de gases en sólidos. Recientemente se ha aplicado este modelo exitosamente en procesos de adsorción de contaminantes en solución acuosa (Cheung *et al.*, 2001; Cheung *et al.*, 2000; Juang y Chen, 1997). La ecuación que describe este modelo es la siguiente:



$$\frac{dq}{dt} = \alpha e^{-\beta q} \quad (2)$$

donde:

$\alpha$  = Velocidad inicial de sorción (mg/g h)

$\beta$  = Constante de desorción (g/mg)

$q$  = Concentración del ion adsorbido (mg/g)

Modelo de Freundlich modificado o de potencia fraccionaria (Schnabel y Potter, 1991):

$$q = K C_o t^{1/m} \quad (3)$$

donde:

$q$  = Concentración del soluto en el adsorbente (mg/g)

$C_o$  = Concentración inicial del soluto en solución (mg/L)

Las constantes ( $1/m$ ) y  $k$  pueden ser calculadas a partir de la pendiente y la ordenada, respectivamente, de la linealización de los datos experimentales. El valor ( $1/m$ ) es independiente de la temperatura y la concentración; mientras que el valor de  $K$  depende de la concentración en la solución.

El proceso de sorción da como resultado la remoción de un soluto de una solución y su concentración en la superficie de un sólido, por lo que la cantidad de soluto remanente en la solución se encuentra en equilibrio dinámico con la cantidad que se concentra en dicha



superficie. En este punto de equilibrio, existe una distribución definida del soluto entre las fases sólida y líquida. El *coeficiente de distribución* es una medida de la posición del equilibrio en el proceso de adsorción, y puede ser función de la concentración de soluto, la concentración y naturaleza de otros solutos presentes, la naturaleza de la solución y algunos otros factores (Susuki, 1990).

La forma más usual de representar esta distribución es expresando la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso de adsorbente,  $q_e$ , como función de la concentración de soluto remanente en la solución en el equilibrio,  $C_e$ , a una temperatura fija. Esto se conoce como *isoterma de adsorción*. Comúnmente, la cantidad de soluto adsorbido,  $q_e$ , se incrementa al aumentar la concentración de la solución, aunque no en proporción directa. Pueden presentarse diferentes tipos de isotermas de adsorción. Las más comunes se obtienen para sistemas en los cuales la adsorción conduce a la deposición de una capa simple de moléculas de soluto en la superficie del sólido. Ocasionalmente se forman capas multimoleculares en la superficie del sólido. Por lo tanto, deben utilizarse modelos de adsorción más complejos para una adecuada descripción del fenómeno (Freeman, 1989).

La ecuación de *Freundlich* es una expresión empírica que implica la heterogeneidad de la superficie y la distribución exponencial de los sitios de adsorción y sus energías (Faust, 1999). La ecuación se expresa como:

$$q_e = K_F C_e^{1/n_F} \quad (4)$$

donde:

$q_e$  = Concentración de soluto adsorbido por peso de adsorbente

$C_e$  = Concentración de soluto en el equilibrio



$K_F$  ,  $1/n_F$  = Constantes características del sistema

## 2. ANTECEDENTES

Ortega *et al.* (2013) emplearon carbón activado en un reactor batch para la remoción de sustancias orgánicas y metales pesados en el tratamiento de aguas residuales, presentando una capacidad máxima de adsorción de 17,7 mg g<sup>-1</sup> a pH 8. Mejía *et al.*, (2009), desarrollaron una metodología mediante reactor batch para pre-tratar una zeolita natural (chabasita) con óxido de magnesio para remover arsénico (As<sup>5+</sup>) en agua de consumo humano. Los resultados del diseño experimental muestran una eficiencia superior a 90 % de As<sup>5+</sup> adsorbido en un tiempo de cinco minutos. Por su parte Dandan *et al.* (2008) estudiaron la modificación de residuo agrícola utilizando soluciones de ácido cítrico para adsorber Pb (II). Realizaron las isothermas de adsorción y desorción de metales pesados como cromo, níquel y manganeso en aguas contaminadas y en aguas residuales de los procesos metalúrgicos por medio de reactor batch. El cual les permitió la incorporación de grupos carboxílicos a la superficie del biosorbente. Rivera y Piña (2004) probaron zeolitas naturales para eliminar arsénico (As) a partir de agua potable conjuntamente con Hierro (Fe) y Manganeso (Mn) en un estudio piloto en pequeña escala de reactor batch, durante el proceso fue removido el 19 al 60% de As, debido a la co-precipitación de los compuestos de Fe y Mn. Así mismo Marshall *et al.* (1993), estudiaron la remoción de metales pesados por medio del sistema batch, cáscara de arroz, indicando que las proteínas y hemicelulosa de la cascara de arroz poseen grupos negativamente cargados a pH levemente ácido (5.8-6.0).

En tanto que diferentes autores han estudiado la adsorción de contaminantes utilizando columnas de lecho empacado. García *et al.*, (2008) removieron As mediante columnas de lecho empacado con zeolita natural obteniendo una eficiencia del 90%, así como se redujo la salinidad del agua.

Petkova (2004) analizó la capacidad de la remoción de As (III) y (V) mediante filtración/columna con diferentes materiales entre los cuales se encontraba la zeolita natural Clinoptilolita mostrando una remoción del 96%.



### 3. IMPORTANCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL FILTRANTE

Las zeolitas naturales presentan un sinnúmero de aplicaciones gracias a sus propiedades químicas, entre las que se destacan el intercambio iónico, selectividad, adsorción, deshidratación y rehidratación. Estas propiedades dependen de la estructura de cada especie (Meier & Olson 1978; Rodríguez-Fuentes 1987).

Las propiedades físicas de una zeolita deben considerarse de dos formas: primero, su descripción mineralógica desde el punto de vista de sus propiedades naturales, y segundo, desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica. De acuerdo con Quintana-Puchol (1996) la deducción de la fórmula cristaloquímica no solo se rige por las leyes de la estequiometría, sino también por leyes cristaloquímicas, y de ello, depende su adsorción.

Las características químicas y estructurales de una zeolita determinada definen, en gran medida, su potencialidad como materia prima para ser utilizada en procesos físicos de separación, purificación y remoción. Estos procesos y de otro tipo son resultados de las características de selección de la estructura molecular que ejercen sobre las moléculas o iones en un fluido determinado, sea este gaseoso o líquido. Esta estructura molecular depende del tamaño y forma de los canales y cavidades del mineral zeolítico y de las dimensiones de las moléculas o iones en el fluido que quieran ingresar hacia estos canales o difundirse desde ellos y cavidades de la zeolita. Por tanto, una comprensión de los procesos de adsorción o absorción que están involucrados conlleva necesariamente el conocimiento de las estructuras porosas del mineral (García-Martínez & Pérez-Pariente 2002).

En las zeolitas la unidad estructural básica es la configuración tetraédrica de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central, generalmente Si y Al:  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  y  $[\text{AlO}_4]$ . La combinación, la disposición de ella y la diferencia total de carga en estos tetraedros influyen en las características de absorción y desorción del mineral zeolítico, así como conduce a las diferentes estructuras. Debido a la posición que ocupan los cationes en la



estructura de la zeolita, el diámetro efectivo del poro puede variar en dependencia del tipo de catión de compensación (Meier & Olson 1978).

La capacidad de intercambio iónico de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa dada de zeolita. Esta capacidad se relaciona directamente con la cantidad de aluminio en la red zeolítica y posee una dependencia directa con su composición química (Breck, 1974). El efecto de la distribución iónica, así como la selectividad al intercambio, determinan el comportamiento de estos materiales, no obstante, no es adecuado predecirlo sin considerar los efectos secundarios relacionados con la influencia del pH, temperatura y composición de la disolución con las que se pondrían en contacto. De hecho, las cualidades de un intercambiador iónico pueden alterarse por la naturaleza y concentración de aniones, cationes concurrentes, solvente y agentes acomplejantes. Numerosas evidencias lo justifican (Rodríguez-Iznaga, Rodríguez- Fuentes & Benítez-Aguilar 2000; Rodríguez-Iznaga *et al.* 2002, 2007; Iglésakis *et al.* 2003; Čapek / 2005) y su análisis permite tener un conocimiento integral del intercambio iónico y de las cualidades de un intercambiador zeolítico bajo diferentes condiciones experimentales. Por lo tanto, sugieren que la capacidad de intercambio de una zeolita debe ser determinada y analizada experimentalmente, por la fuerte dependencia que esta propiedad posee de diversos factores como la concentración y la naturaleza de los cationes intercambiables, así como de los efectos asociados del medio, entre otros.

El empleo de zeolitas naturales en descontaminación ambiental ha mostrado resultados positivos, sobre todo para la descontaminación de metales pesados presentes en aguas residuales e industriales (Cooney & Booker 1999; Iglésakis *et al.* 2003). Específicamente la eliminación de cromo, arsénico y fierro es un tema ampliamente abordado por distintos autores (Sui *et al.* 2008; Figueiredo *et al.* 2010; Yuan *et al.* 2010; Mabrouk *et al.* 2011). Kissler & Manning (2010) reportan que las zeolitas tratadas con  $\text{Fe}^{+2}$  remueven satisfactoriamente el  $\text{Cr}^{+4}$  porque favorecen su reducción a  $\text{Cr}^{+3}$ , no obstante, las zeolitas naturales de Túnez han probado ser potencialmente útiles en la remoción de Cr y As (Mabrouk *et al.* 2011). Se asegura que el pH posee un papel predominante en la adsorción de Cr, Fe y As de modo que la mayor remoción se obtiene a pH ácidos (Ajouyed *et al.* 2010), o



cercanos a la neutralidad para la zeolita natural según es reportado por Basaldella *et al.* (2007).

Como se ha expresado, por los avances de la ciencia y la tecnología, el conocimiento de las propiedades de todos los materias y recursos minerales para su total y completo aprovechamiento, se ha convertido en una tarea de significativa importancia. Las propiedades físicas y químicas de las zeolitas son un reflejo marcado por sus características químicas y estructurales.



#### 4. JUSTIFICACIÓN

El Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), perteneciente a la UNESCO, considera que la contaminación de agua con arsénico (As) afecta a 140 millones de personas en 70 países del mundo. En América Latina países como: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Ecuador, el Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Perú y Uruguay; presentan una elevada cantidad de arsénico en agua (McClintock *et al.*, 2012).

En México, la Comarca Lagunera localizada entre los estados de Coahuila y Durango, es la región más estudiada y la primera en donde se reconocieron los problemas debido a la presencia de arsénico en el agua subterránea. Wyatt *et al.* (1998) encontraron concentraciones de arsénico en el agua subterránea de 29 ciudades en el estado de Sonora con un rango de 2–305 µg/L. En el estado de Chihuahua, Barrera (2008) analizó muestras de agua subterránea de las localidades de Julimes y Meoqui, las cuales resultaron con un alto porcentaje de As, por arriba de 0.025 mg/L, establecido como límite permisible en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Es importante mencionar que específicamente en el Municipio de Julimes, actualmente se encuentra el pozo denominado “La Regina” que contiene concentraciones de arsénico de 0.277 mg/L.

Aunque existen técnicas para remover el arsénico y otros contaminantes en el agua, resulta difícil encontrar aquella que se adapte a las características propias de cada región, sea eficiente en la remoción del contaminante As y que, además, sea económicamente rentable para grandes y pequeñas cantidades de agua (Gotkowitz *et al.*, 2008).



## 5. OBJETIVOS

### **Objetivo General.**

Evaluar la remoción de arsénico en agua que presenta la zeolita natural utilizando un sistema batch vs columna empacada.

### **Objetivos Específicos**

- Muestrear y caracterizar zeolita natural del Ejido La Haciendita, Municipio de Chihuahua
- Preparar solución de concentración de arsénico conocido
- Diseñar y establecer las condiciones del sistema batch y lecho empacado con la zeolita natural
- Analizar y evaluar la remoción de arsénico que presenta la zeolita en el sistema batch y el lecho empacado
- Analizar los cambios de pH que el agua sufre al contacto con la zeolita en el sistema batch
- Dar a conocer el porcentaje de remoción de arsénico en agua del sistema batch y columna empacada, así como ventajas y desventajas.



## **6. HIPOTESIS**

La remoción de arsénico que presenta la zeolita en el sistema batch es mayor que en la columna empacada.



## 7. METODOLOGIA

### 7.1. Recolección de zeolita natural

Se recolecto zeolita natural del Ejido “La Haciendita”, este se localiza en el Municipio de Chihuahua, al poniente de la capital del estado de Chihuahua (Avenida La Cantera), aproximadamente 500 metros al Oeste de la Avenida De la Juventud, actualmente este Ejido conforma el desarrollo residencial (La Cantera, Villa Toscana, Las Misiones, Rinconadas del Valle, etc). En la figura 7 se observar la ubicación exacta de la localidad.



*Figura 7. Ubicación del Ejido “La Haciendita”, Municipio de Chihuahua*



Cabe mencionar que para la extracción de la zeolita solo fue necesario una pala debido a que se están llevando a cabo trabajos de excavación para la construcción de fraccionamientos residenciales y lugares para la recreación familiar (Figura 8).

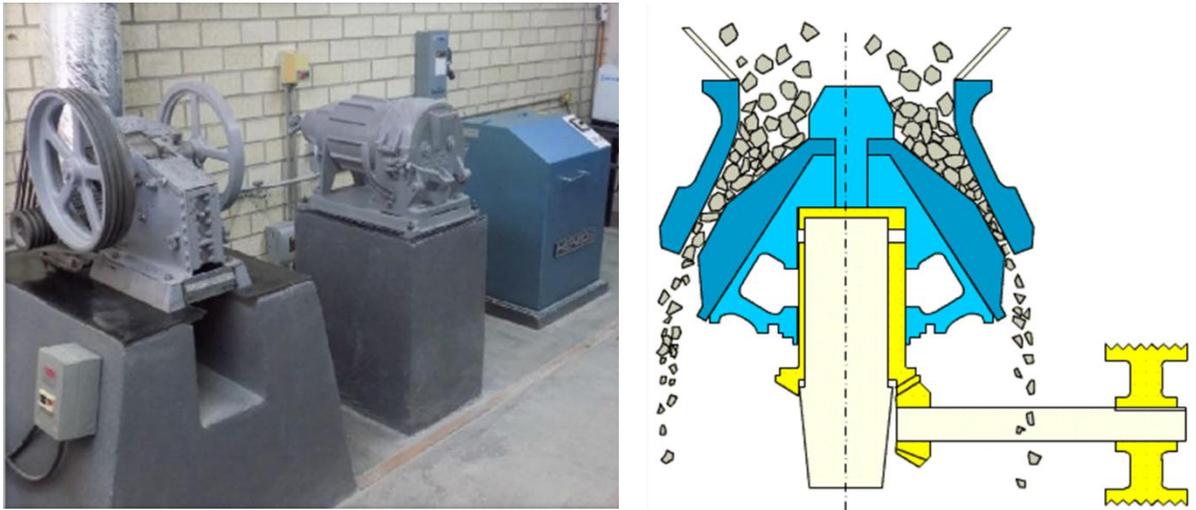


*Figura 8. Excavaciones de material zeolita*



## 7.2.Molienda

La molienda se llevo a cabo en el Laboratorio de Metalurgia perteneciente a la Facultad de Ingeniería, utilizando las quebradoras de quijada y de cono (Figura 9).



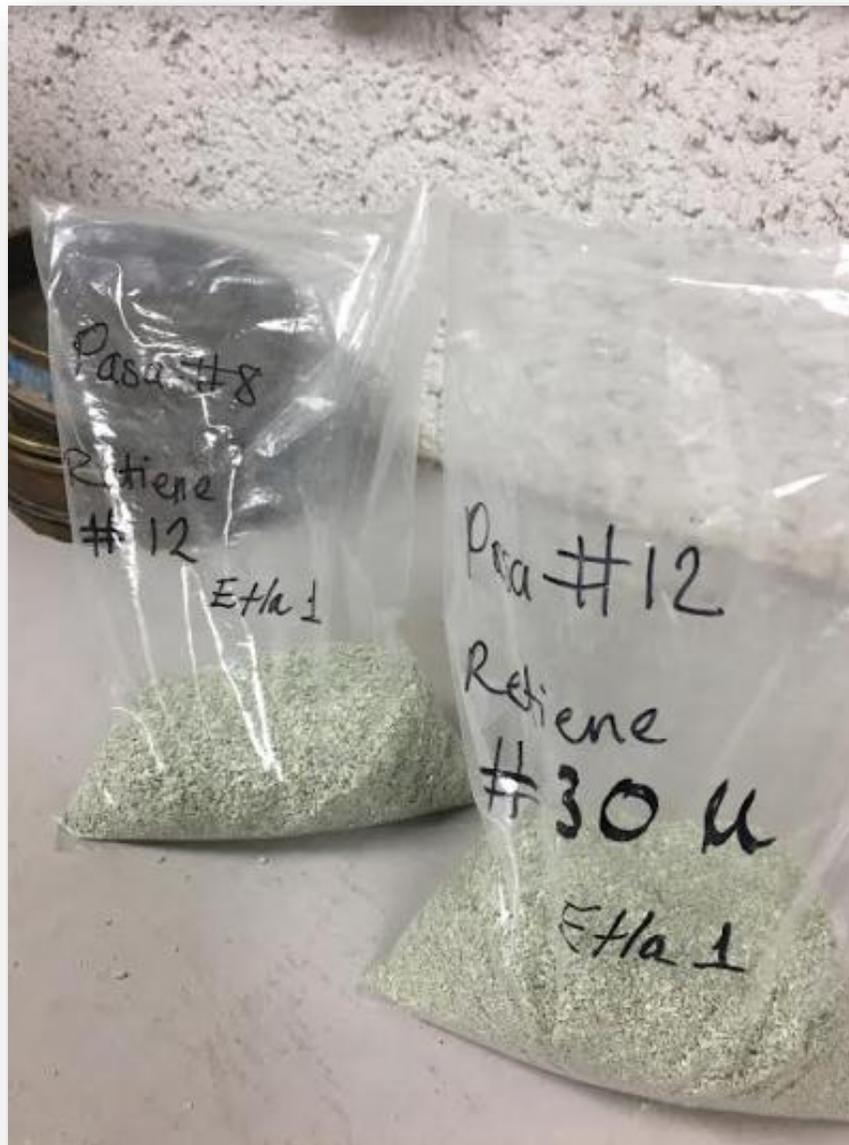
*Figura 9. Trituración de la zeolita*

## 7.3.Tamizado

La muestra triturada fue pasada por los diferentes tamices, seleccionando el material que quedo en la criba #12 y #30 (Figura 10 y 11)



*Figura 10. Tamizado de la zeolita*



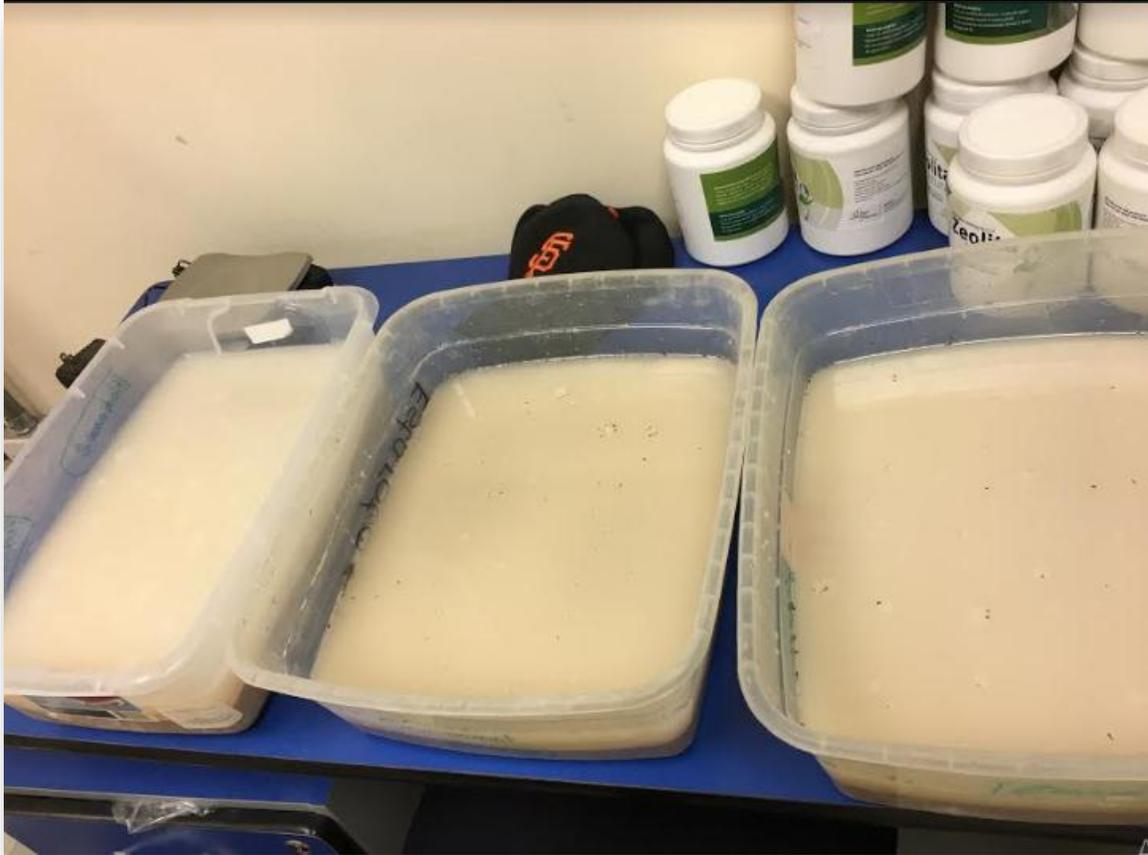
*Figura 11. Material cribado malla #12 y #30*

#### **7.4. Lavado y secado de zeolita**

Posteriormente la zeolita fue saturada con agua destilada (Figura 12) por un periodo de 24 horas para eliminar el polvo fino producido por el proceso de trituración. Pasado este



lapso de tiempo, se retiró el exceso de agua y fue secada en un horno de secado Felisa, Modelo FE-294AD durante 72 horas a 100°C.



*Figura 12. Lavado de zeolita*

## 8. CARACTERIZACIÓN

### 8.1. Difracción de Rayos X

La muestra de zeolita se analizó por difracción de rayos X con el equipo Panalytical modelo X'Pert PRO (Figura 13), Siemens modelo D5000 perteneciente al Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV), para la determinación de su composición mineralógica para su clasificación posterior.





*Figura 13. Equipo de Difracción de Rayos X*

## **8.2. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido.**

Se analizó la zeolita natural mediante un SEM, marca JEOL 6010 Plus, Modo de imagen de electrones secundarios y retro-dispersionados perteneciente al CIMAV.

## **8.3. Petrografía**

Mediante la realización de una sección delgada y la utilización del microscopio electrónico, se procedió a realizar la descripción petrográfica de una muestra de zeolita (Figura 14). Este estudio fue realizado en el Laboratorio de Geología de la Facultad de Ingeniería.



*Figura 14. Análisis Petrográfico*

#### **8.4. Preparación de solución de arsénico**

Se preparó soluciones de agua destilada con arsénico a concentraciones iniciales de 0.5 y 0.8 ppm para ello se utilizó un estándar original de de 1000 mg  $\pm$  5 mg/L marca Merk pureza 98%.

#### **9. SISTEMA BATCH**

La evaluación de la remoción de arsénico en el sistema batch se llevó a cabo en 8 frascos de vidrio de 350 mililitros, se pesaron 5 gr de zeolita y se agregaron 50 ml de las soluciones conocidas de arsénico (0.5 y 0.8 ppm). Se mezclaron continuamente durante 2, 4, 6 y 12 hrs. En agitadores Marca LabTech, Modelo LMS-3006 a velocidad constante



(1000 rpm). Transcurridos los tiempos cada frasco era retirado y se dejaba en reposo hasta la separación de las dos fases solido-liquido de forma natural por último se procedió a la medición de la concentración de As resultante mediante espectrometría de absorción atómica (Figura 15).



*Figura 15. Sistema Batch*

### **9.1. Medición del cambio de pH**

El pH de las soluciones de 0.8 y 0.5 ppm se midió constantemente con un Hanna pHep hasta que este se mantuvo constante (Figura 16).



*Figura 16. Medición de pH*

## **10. COLUMNA DE ADSORCIÓN**

Se utilizaron 6 tubos de polietileno transparente de 3.5 cm de diámetro y 30 cm de largo, sellándolos con malla mosquitera y papel film para evitar la fuga de agua y de material triturado de zeolita. La zeolita fue empacada a diferentes alturas: 10, 15 y 20 cm de espesor (Figura 17). Se hizo pasar la solución con la concentración inicial de 0.5 ppm por los lechos



empacados con zeolita, se recolectaron alícuotas de 50 ml y se procedió a determinar la concentración de arsénico mediante espectrometría de absorción atómica. Cabe mencionar que se realizó el mismo procedimiento para la concentración de 0.8 ppm.



*Figura 17. Lechos empacados*

## 11. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El difractograma (Figura 18) obtenido en el análisis de DRX del material zeolítico dio como resultado principal la presencia de clinoptilolita con formula



$\text{Al}_{1.2}\text{Ca}_{1.58}\text{H}_{30}\text{O}_{46.9}\text{Si}_{16.8}$ , según el programa MATCH donde se compararon los patrones de rayos X con el número de tarjeta 96-900-9579.

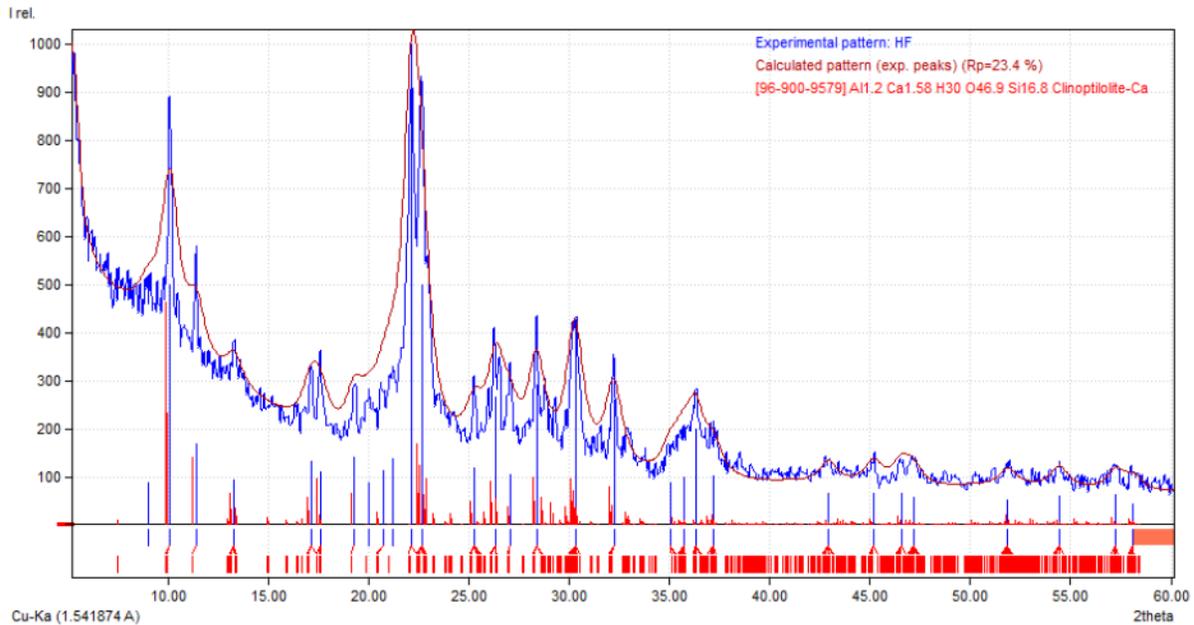


Figura 18. Difractograma del material zeolítico

Los picos más altos en el difractograma corresponden al silicio (Si) y al aluminio (Al), seguidos del calcio (Ca), sodio (Na) y potasio (K) en proporciones similares. Lo cual corresponde a la composición principal de la zeolita de tipo clinoptilolita: un aluminosilicato de calcio, con variaciones en su concentración de Na, K, Ba (bario) y Sr (estroncio).

Para el análisis elemental y la morfología de la zeolita en el microscopio electrónico de barrido (SEM). Los resultados indicaron que los elementos que componen principalmente el material extraído de La Haciendita son: oxígeno (O), silicio (Si), aluminio (Al), potasio (K), hierro (Fe), sodio (Na) y magnesio (Mg).

En cuanto a la petrografía la muestra de mano (Figura 19) presenta un color grisaseo en la parte superior con tonos de rojos y rosado en gran parte de la roca. Dispersas por la misma, se pueden observar algunas manchas de color blanco. En su mayoría tiene una matriz fina con cristales de un tamaño mediano (principalmente plagioclasas); correspondiendo a una textura porfídica. Los cristales de plagioclasas tienen unas formas subhedrales a euhedrales, con formas muy definidas y de ligera a medianamente alterados y fracturados.



Además, se pueden observar pequeños fragmentos de roca, completamente anhedrales y con ayuda de una lupa de mano, pueden alcanzarse a ver muy fracturados, indicando, junto con todo lo mencionado anteriormente, que la muestra de zeolita es de origen volcánico. Los diferentes cambios de color dentro de la misma roca, indican una alteración hidrotermal, confirmando este hecho el fracturamiento que se observa a lo largo de la muestra.



*Figura 19. Muestra de mano*

Con el microscopio electrónico se pudieron observar los siguientes minerales:

- Sanidina: Perteneciente a la variedad del feldespato potásico, un mineral formado a alta temperatura en ambientes volcánicos de tipo ácido, lo cual le da una composición elemental de potasio y sodio. Los cristales presentes son subhedrales, ligeramente fracturados debido a la explosión que los formó. Sin los



nicos puestos en el microscopio, son incoloros con tonos ligeramente amarillentos, monoclinico, los cristales son tubulares, no presentan pleocroísmo. Con los nicos cruzados presentan su característica macla Carlsbad.

- **Plagioclasa:** Es el conjunto de minerales que comprenden la serie de albita-anortita, pertenece al grupo de los silicatos y al sistema cristalino triclinico. Los elementos que la componen es una variación entre Na y Ca, según el contenido de estos elementos las plagioclasas tienen diferentes variantes. La variedad presente en la zeolita corresponde a la Andesina que combina en un 50% estos dos elementos. Con una forma subhedral, las orillas se encuentran ligeramente rotas, con un ángulo de exfoliación de casi  $90^\circ$  y que va siguiendo las múltiples maclas observadas en el cristal. El hidrotermalismo que presenta la zona provoca que la plagioclasa tenga una alteración argílica. Por la forma acicular y los tonos amarillos en los cristales de plagioclasa, se infiere que las arcillas formadas pertenecen al mineral de sericita.

- **Cuarzo:** Los cristales son anhedrales, ligeramente fracturados y dispersos por la matriz de la muestra de diversos tamaños, incoloros y sin impurezas o con impurezas ligeras. El sistema cristalino es romboédrico, con extinción normal, bajo relieve, baja birrefringencia, sin exfoliación ni maclas.

- **Biotita:** Perteneciente al sistema cristalino monoclinico, con secciones alargadas en forma tubular, subhedral con fracturamiento, exfoliación muy fina y regular paralela al alargamiento, Es de color marrón con fuertes tonos rojizos, presenta un pleocroísmo muy débil. Su relieve es de bajo a medio y la birrefringencia es alta

- **Vidrio volcánico:** Se encuentra disperso en la roca, generalmente en forma de vetas rellenas los espacios entre los demás microcristales que forman la matriz. Debido al relieve, se puede determinar que es de composición ácida y si encuentra alterándose a sericita debido al hidrotermalismo que ha sufrido la muestra.



- **Minerales opacos:** Estos no transmiten la luz al microscopio por lo que aparecen negros con nicoles paralelos y con nicoles cruzados. En las rocas ígneas con fuerte hidrotermalismo generalmente corresponde a óxidos de fierro y titanio. No presentan forma definida.

**Generalidades:** está compuesta mayormente por feldespatos, plagioclasas y cuarzos con ligeros fragmentos líticos y vidrio volcánico. Estos cristales corresponden a una roca ígnea de origen explosivo, generalmente tobas. Por lo tanto, se clasificaría como una toba polimíctica o toba cristalina-lítica. La sustitución parcial de algunos cristales por sericita son indicio de una alteración hidrotermal.

#### 11.1. Isotermas de adsorción de sistema batch

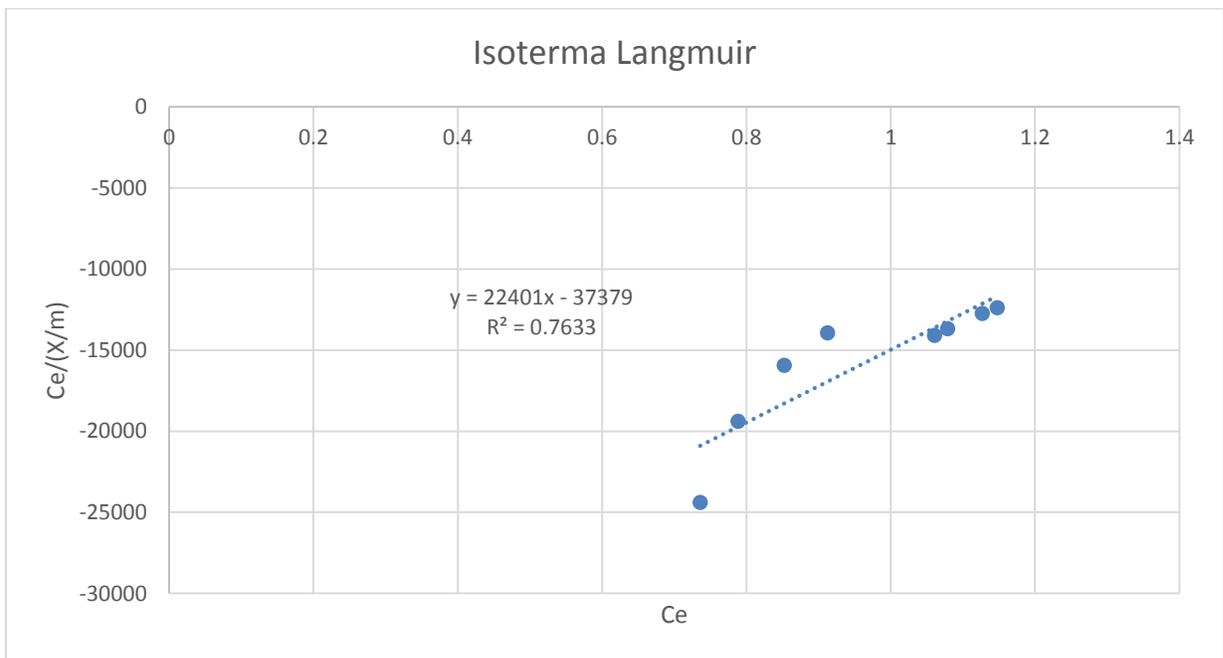
En la Tabla. 1 se muestran los datos de las concentraciones iniciales  $C_0$  y las concentraciones finales  $C_e$ ,  $X$  es la masa del adsorbato y  $m$  es la masa del adsorbente. La información obtenida y los datos calculados se utilizaron para realizar los isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

*Tabla 1. Datos de isotermas, Sistema batch.*

| Muestra | $C_0$<br>(ppm) | $C_e$ (ppm) | $X(C_0-C_e)$<br>(ppm) | $m$ (mg) | $X/m$       | $C_e/(X/m)$ |
|---------|----------------|-------------|-----------------------|----------|-------------|-------------|
| 2h-0.5  | 0.585          | 0.91265918  | -0.32765918           | 5000     | 6.55318E-05 | 13926.9589  |



|         |       |            |             |      |             |            |
|---------|-------|------------|-------------|------|-------------|------------|
| 4h-0.5  | 0.585 | 0.78831461 | -0.20331461 | 5000 | 4.06629E-05 | 19386.5709 |
| 6h-0.5  | 0.585 | 0.73588015 | -0.15088015 | 5000 | 3.0176E-05  | 24386.248  |
| 12h-0.5 | 0.585 | 0.85273408 | -0.26773408 | 5000 | 5.35468E-05 | 15925.0192 |
| 2h-0.8  | 0.684 | 1.12689139 | -0.44289139 | 5000 | 8.85783E-05 | 12721.9836 |
| 4h-0.8  | 0.684 | 1.07895131 | -0.39495131 | 5000 | 7.89903E-05 | 13659.2952 |
| 6h-0.8  | 0.684 | 1.06097378 | -0.37697378 | 5000 | 7.53948E-05 | 14072.2489 |
| 12h-0.8 | 0.684 | 1.14786517 | -0.46386517 | 5000 | 9.2773E-05  | 12372.8321 |



**Grafico 1. Isoterma de Langmuir en Sistema Batch**

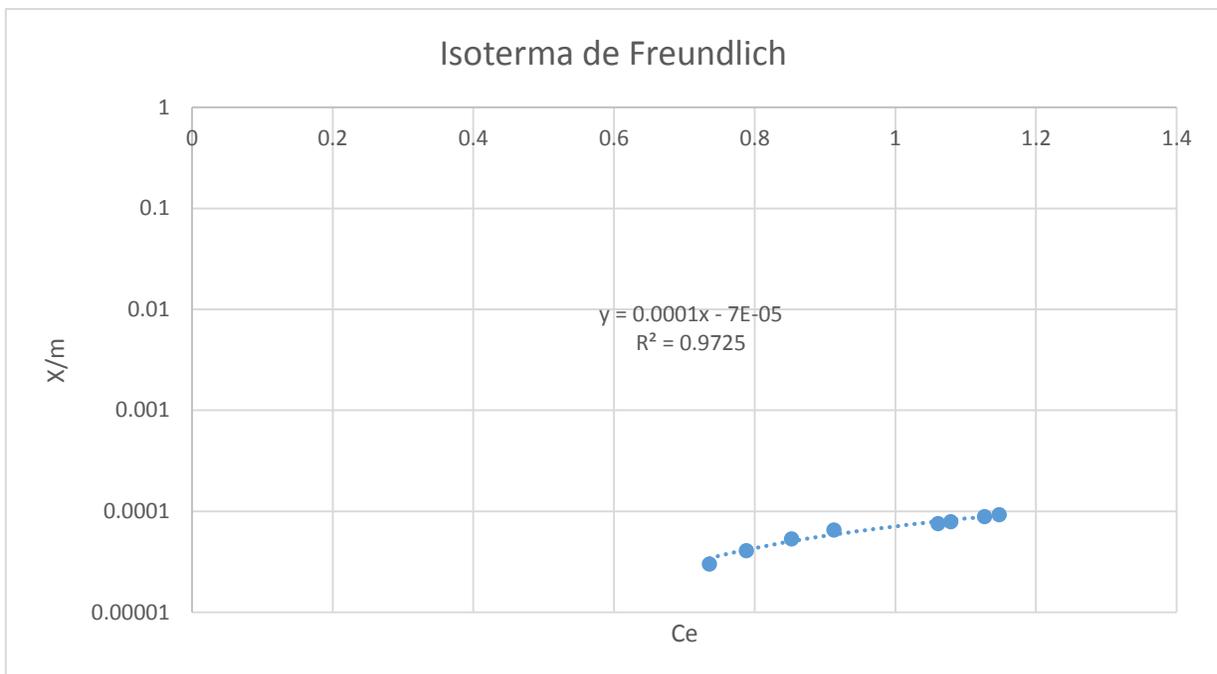
El gráfico 1 muestra la isoterma de Langmuir, la ecuación que la representa es la siguiente:

$$y=22401x - 37379$$



El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión, y refleja el grado de ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar. En este isoterma el resultado  $R^2 = 0.7633$

Utilizando la ecuación de Freundlich, se obtuvo el gráfico 2 que se observa a continuación:



**Grafico 2.** *Isoterma de Freundlich en Sistema Batch*

La ecuación obtenida del grafico fue la siguiente:

$$y=0.0001x - 7E-05$$

Con respecto al coeficiente de determinación, se obtuvo una  $R^2 = 0.9725$

Generalmente el resultado del coeficiente de determinación varía entre 0 y 1. En cuanto mas cerca de 1 se encuentre el valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que

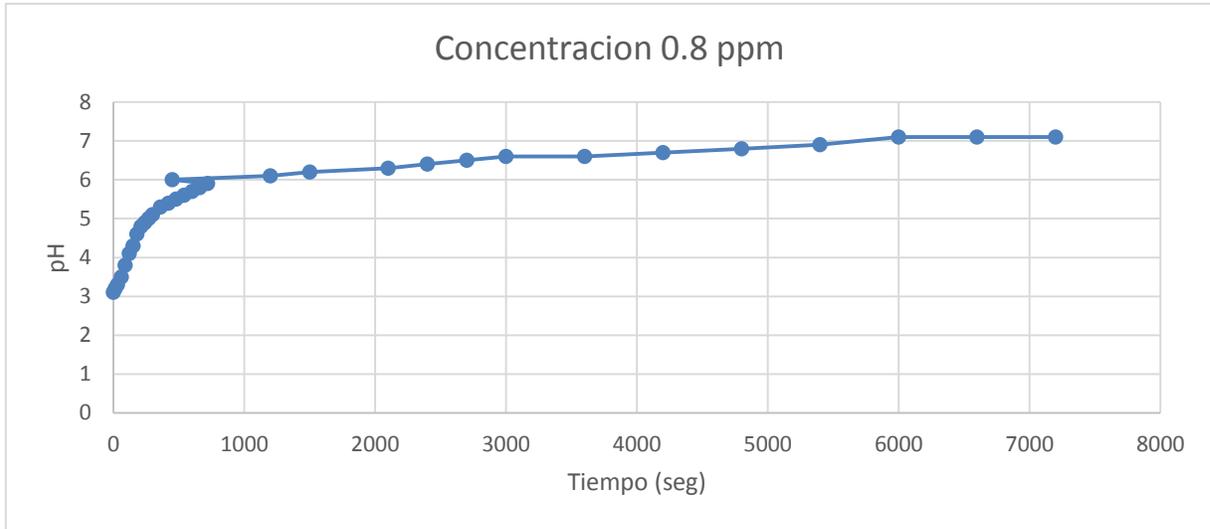


se esta trabajando. De manera inversa, un valor cercano a 0, menor ajuste, por lo tanto, menos confiable será. El modelo de Freundlich, es el que se ajusta mejor. El promedio de remoción en el sistema batch apenas alcanzo el 24.85%.

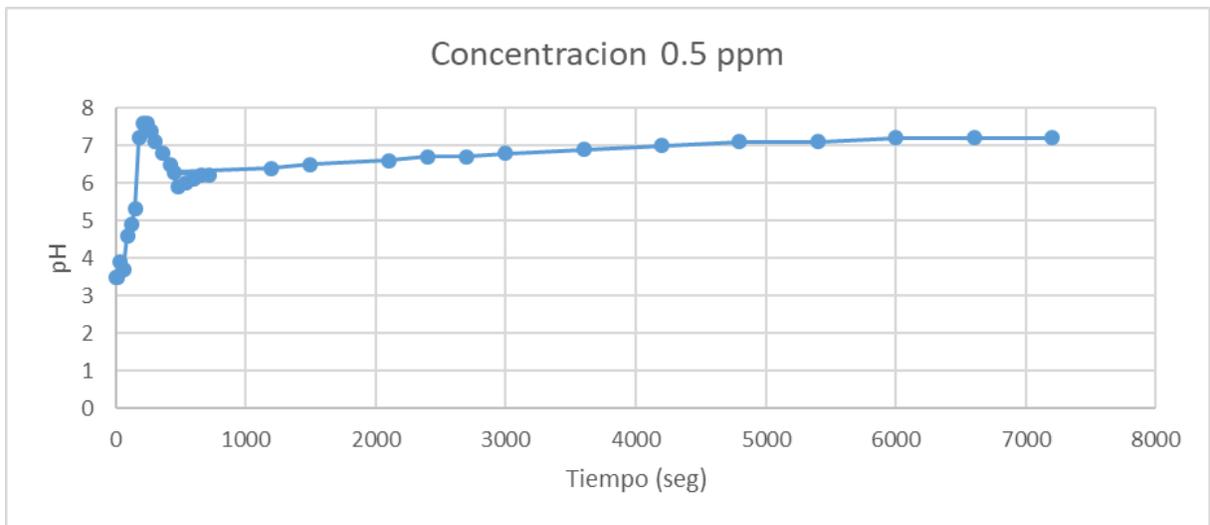
La distribución y movilidad del arsénico depende de la interacción de factores geoquímicos como pH, reacciones oxido-reducción, distribución de otras especies iónicas, actividad microbiana, reacciones con otros compuestos (Jang *et al.* 2010). El pH y potencial redox son los factores más importantes que controlan los estados de oxidación del arsénico. Bajo condiciones reductivas y a valores de pH menor a 9,  $H_3AsO_3$  es la especie dominante (Vaclavikova et al 2008). Las especies de arsénico a diferencia de otros metales tóxicos que son insolubles conforme aumenta el pH, el arsénico es soluble a pH neutro (6-8). Es por eso que el agua subterránea es fácilmente contaminada por este elemento (Vu *et al.* 2003).

En presencia de otros elementos como aluminio, calcio, hierro o manganeso, pueden afectar la solubilidad o precipitación del As, por lo que también son factores importantes para determinar la capacidad de remoción en agua de este metal.

Los gráficos 3 y 4 muestran el comportamiento del pH en las dos soluciones de concentraciones conocidas que se generaron para el Sistema batch. Estos gráficos dan a conocer que los tiempos de 2, 4, 6 y 12 hrs para la remoción en el sistema batch fueron demasiado grandes ya que la remoción del As en ambas soluciones se llevo a cabo aproximadamente en los primeros 20 minutos. El pH inicial en el tiempo cero de la solución de 0.8 ppm fue 3.1, incrementándose conforme transcurrieron los 20 min, alcanzando un pH de 7, mismo que se mantuvo constante. En tanto que el pH inicial en el tiempo cero de la solución de 0.5 ppm fue de 2.7, al igual que la solución de 0.8 ppm se incrementó conforme transcurría el tiempo manteniéndose constante y estabilizándose en un pH de 7.



**Gráfico 3.** Tiempo vs pH, concentración 0.8 ppm



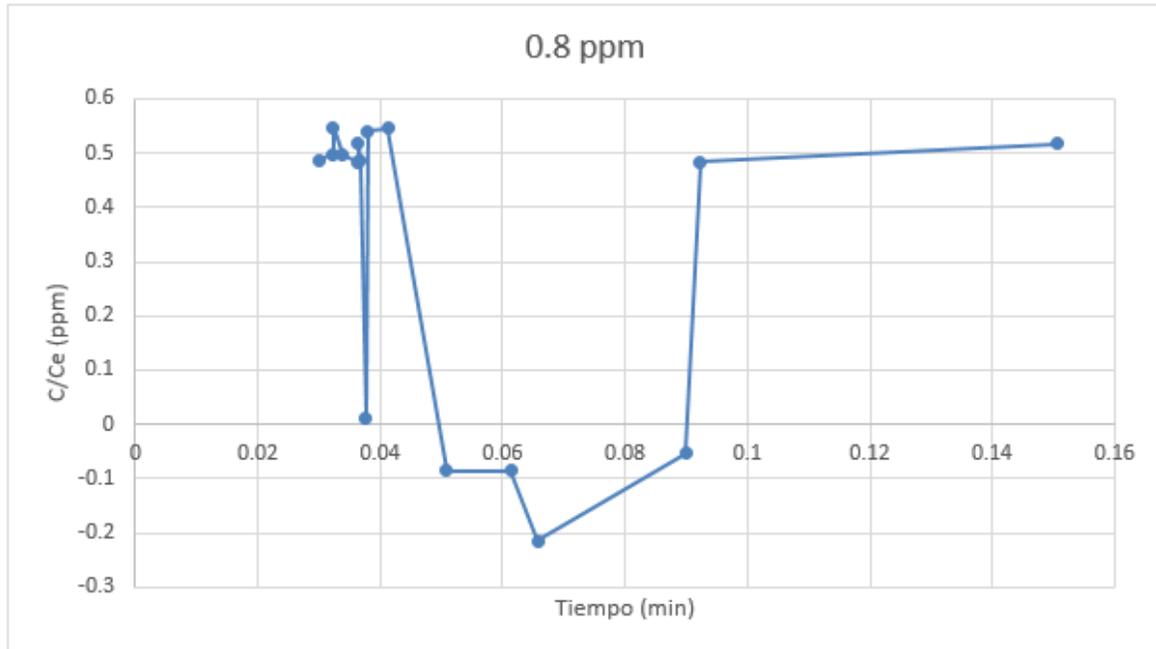
**Gráfico 4.** Tiempo vs pH, concentración 0.5 ppm

Diferentes autores (DeMarco *et al.*, 2003, Mohan y Pittman, 2007, Han *et al.*, 2002) mencionan la relación entre el pH y el proceso de remoción de arsénico en agua con zeolita, los cuales aconsejan realizar primero una medición de pH en un Sistema batch para diseñar el proceso de lecho empacado.

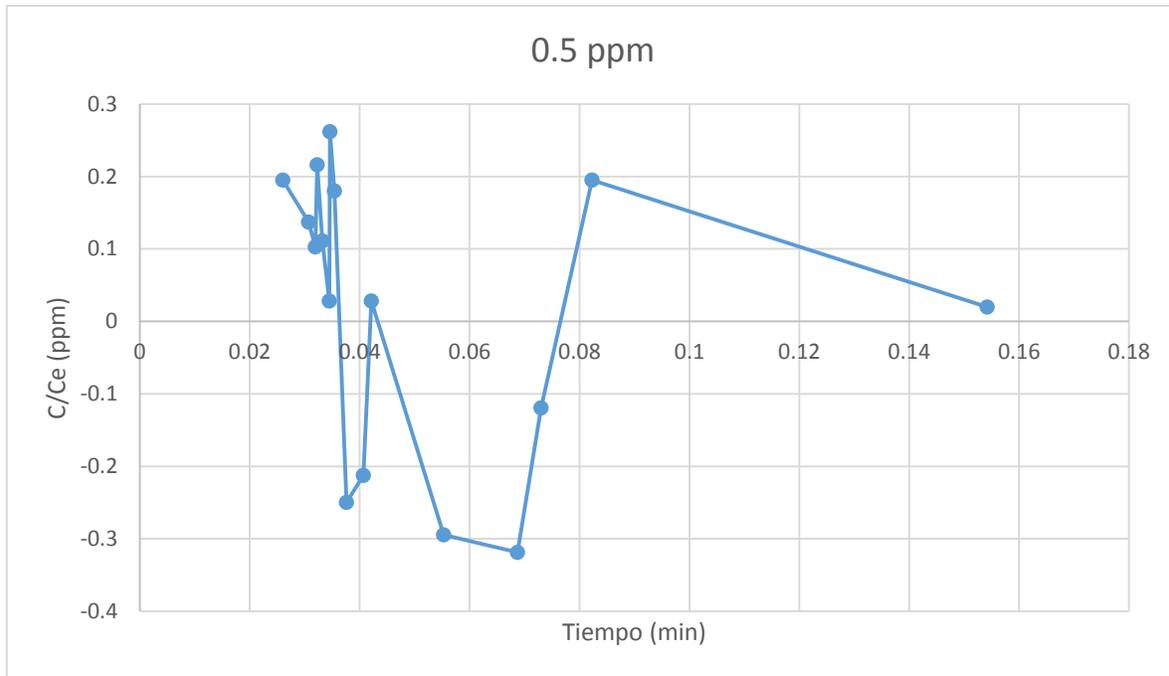


## 11.2. Columnas de adsorción

En los gráficos 5 y 6 se muestra el comportamiento que presentan las concentraciones con respecto al tiempo.



*Grafico 5. Concentración vs. tiempo (0.8ppm)*



**Grafico 6.** Comportamiento de concentración vs. tiempo (0.5 ppm)

En ambas concentraciones, se obtuvo mayor remoción con un lecho de 15 centímetros y un tiempo promedio de 0.034 minutos, con un porcentaje de remoción de 48.84%.

Como se puede observar en la gráfica anterior (figura 5), existen puntos en donde en lugar de adsorber el contaminante, se le está agregando arsénico al agua. Todos estos puntos corresponden a la columna que tiene el espesor mayor, de 20 centímetros de lecho, y además, se encuentran en el tiempo promedio dentro de los valores obtenidos.

En la Tabla 2 se muestran los datos de la concentración de arsénico inicial, de 0.8 y 0.5ppm, y la final ( $C/C_0$ ), para la realización de las isothermas de Langmuir y Freundlich.



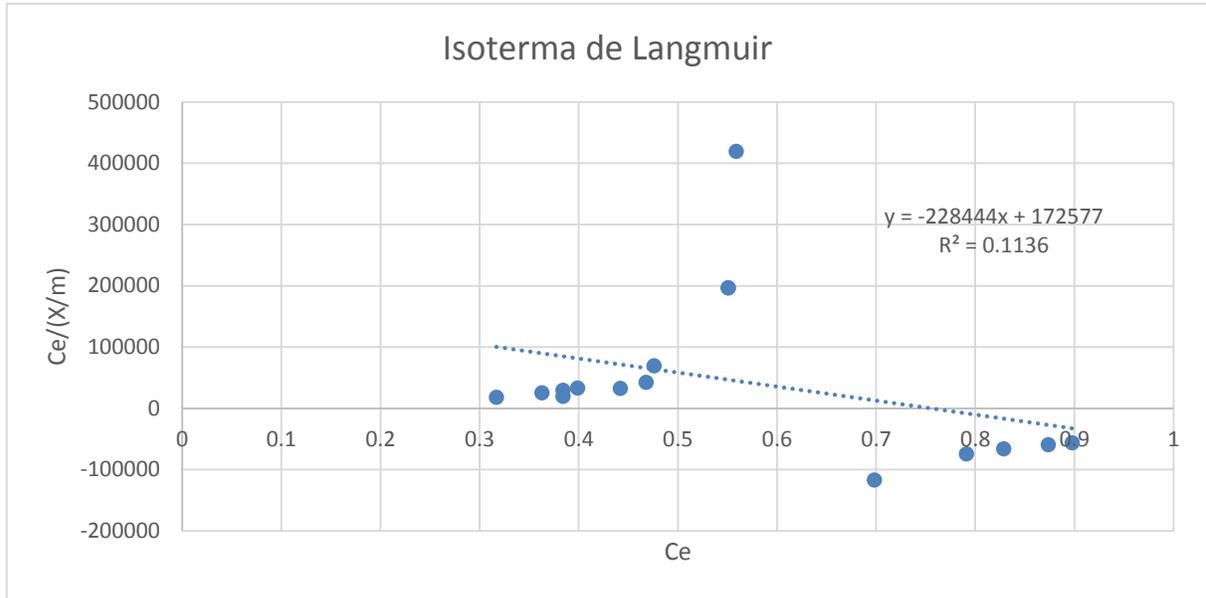
*Tabla 2. Datos de Isoterma de lecho empacado*

| Muestra  | Co (ppm) | Ce (ppm)   | Tiempo (min) | C/Ce        | m(mg) | X/m         | Ce/(X/m)    |
|----------|----------|------------|--------------|-------------|-------|-------------|-------------|
| 10-4-0.5 | 0.579    | 0.442      | 0.307        | 0.137       | 10000 | 0.0000137   | 32262.7737  |
| 10-6-0.5 | 0.579    | 0.468      | 0.332        | 0.111       | 10000 | 0.0000111   | 42162.1622  |
| 10-5-0.5 | 0.579    | 0.551      | 0.345        | 0.028       | 10000 | 2.8E-06     | 196785.714  |
| 10-3-0.5 | 0.579    | 0.551      | 0.421        | 0.028       | 10000 | 2.8E-06     | 196785.714  |
| 10-1-0.5 | 0.579    | 0.384      | 0.823        | 0.195       | 10000 | 0.0000195   | 19692.3077  |
| 15-3-0.5 | 0.579    | 0.384      | 0.26         | 0.195       | 15000 | 0.000013    | 29538.4615  |
| 15-2-0.5 | 0.579    | 0.476      | 0.319        | 0.103       | 15000 | 6.8667E-06  | 69320.3883  |
| 15-6-0.5 | 0.579    | 0.363      | 0.323        | 0.216       | 15000 | 0.0000144   | 25208.3333  |
| 15-4-0.5 | 0.579    | 0.317      | 0.346        | 0.262       | 15000 | 1.7467E-05  | 18148.855   |
| 15-5-0.5 | 0.579    | 0.399      | 0.354        | 0.18        | 15000 | 0.000012    | 33250       |
| 15-1-0.5 | 0.579    | 0.559      | 1.542        | 0.02        | 15000 | 1.3333E-06  | 419250      |
| 20-5-0.5 | 0.579    | 0.82876404 | 0.376        | -0.24976404 | 20000 | -1.2488E-05 | -66363.7591 |
| 20-4-0.5 | 0.579    | 0.79131086 | 0.407        | -0.21231086 | 20000 | -1.0616E-05 | -74542.6641 |
| 20-6-0.5 | 0.579    | 0.87370787 | 0.553        | -0.29470787 | 20000 | -1.4735E-05 | -59293.1488 |
| 20-3-0.5 | 0.579    | 0.8976779  | 0.87         | -0.3186779  | 20000 | -1.5934E-05 | -56337.6309 |
| 20-2-0.5 | 0.579    | 0.69842697 | 0.73         | -0.11942697 | 20000 | -5.9713E-06 | -116963.026 |
| 10-6-0.8 | 1.12     | 0.633      | 0.0299       | 0.487       | 5000  | 0.0000974   | 6498.97331  |
| 15-2-0.8 | 1.12     | 0.622      | 0.0323       | 0.498       | 5000  | 0.0000996   | 6244.97992  |



|          |      |            |        |             |      |             |             |
|----------|------|------------|--------|-------------|------|-------------|-------------|
| 15-5-0.8 | 1.12 | 0.573      | 0.0323 | 0.547       | 5000 | 0.0001094   | 5237.65996  |
| 15-6-0.8 | 1.12 | 0.624      | 0.0339 | 0.496       | 5000 | 0.0000992   | 6290.32258  |
| 15-3-0.8 | 1.12 | 0.637      | 0.0363 | 0.483       | 5000 | 0.0000966   | 6594.2029   |
| 10-4-0.8 | 1.12 | 0.603      | 0.0364 | 0.517       | 5000 | 0.0001034   | 5831.72147  |
| 10-5-0.8 | 1.12 | 0.635      | 0.0367 | 0.485       | 5000 | 0.000097    | 6546.39175  |
| 20-5-0.8 | 1.12 | 1.10741573 | 0.0377 | 0.01258427  | 5000 | 2.5169E-06  | 440000      |
| 10-2-0.8 | 1.12 | 0.58       | 0.038  | 0.54        | 5000 | 0.000108    | 5370.37037  |
| 10-3-0.8 | 1.12 | 0.574      | 0.0413 | 0.546       | 5000 | 0.0001092   | 5256.41026  |
| 20-6-0.8 | 1.12 | 1.20479401 | 0.0508 | -0.08479401 | 5000 | -1.6959E-05 | -71042.4028 |
| 20-4-0.8 | 1.12 | 1.20479401 | 0.0614 | -0.08479401 | 5000 | -1.6959E-05 | -71042.4028 |
| 20-3-0.8 | 1.12 | 1.33513109 | 0.0658 | -0.21513109 | 5000 | -4.3026E-05 | -31030.6407 |
| 20-2-0.8 | 1.12 | 1.17333333 | 0.0899 | -0.05333333 | 5000 | -1.0667E-05 | -110000     |
| 10-1-0.8 | 1.12 | 0.637      | 0.0923 | 0.483       | 5000 | 0.0000966   | 6594.2029   |
| 15-1-0.8 | 1.12 | 0.602      | 0.1507 | 0.518       | 5000 | 0.0001036   | 5810.81081  |

Las isothermas de adsorción indican como las moléculas adsorbidas se distribuyen entre la fase líquida y la sólida cuando el proceso de adsorción alcanza un estado de equilibrio (Okeola y Odeunmi 2010). Muchos modelos describen la adsorción, sin embargo, los investigadores usualmente utilizan los modelos de adsorción propuestos por Langmuir y por Freundlich para comprender el fenómeno de la adsorción (Ding et al. 2008). Debido a esto, de igual manera se utilizaron las isothermas de Langmuir y Freundlich para ver el comportamiento del arsénico con la zeolita en las columnas de adsorción.

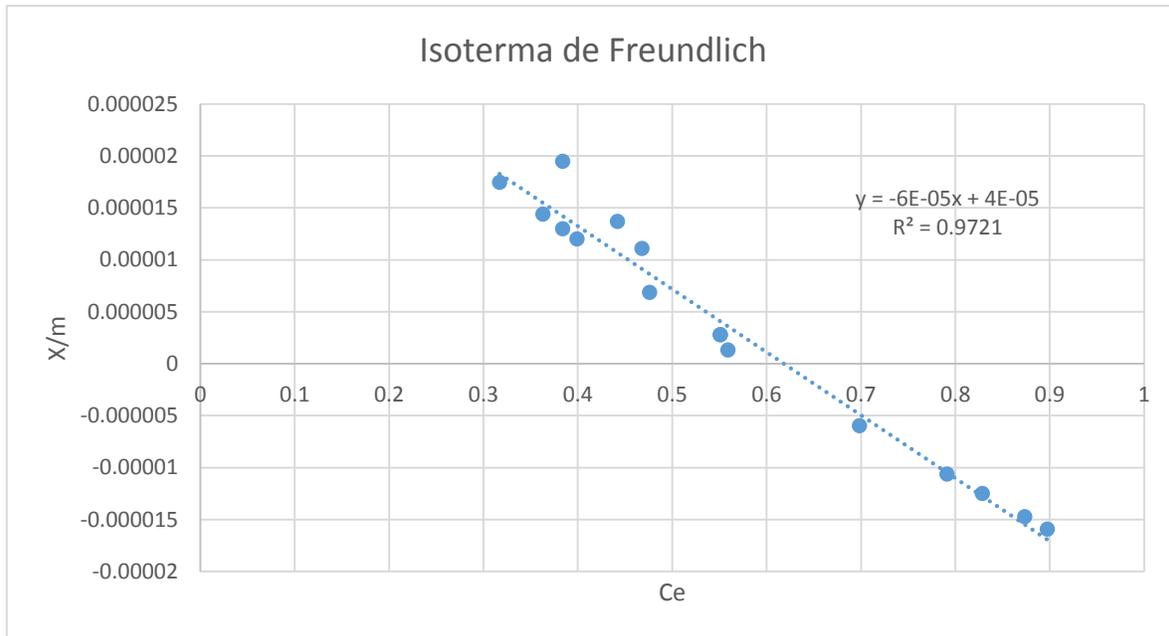


***Grafico 7. Isotherma de Langmuir para columna***

En el grafico 7 se observa el isoterma de Langmuir, que está interpretado por la ecuación:

$$y = 228444x + 172577$$

El coeficiente de determinación fue de:  $R^2 = 0.1136$



**Grafico 8. Isoterma de Freundlich para columna**

En el grafico 8 se muestra el isoterma de adsorción representada con la ecuación siguiente:

$$y = -6E-05x + 4E-05$$

Con respecto al coeficiente de determinación fue de: **R<sup>2</sup> = 0.9721**

Comparando el resultado de las isotermas del sistema batch y las columnas de adsorción, en ambos, la isoterma de Freundlich fue el que obtuvo un coeficiente de determinación más cercano a uno, por lo tanto, se asume que la superficie de la zeolita es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. También se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que sólo se adsorbe una monocapa, tal como lo indica el principio de isoterma de adsorción de Freundlich.

El mejor porcentaje de remoción se obtuvo con las columnas de adsorción, con un promedio de 48%. Por su parte, el reactor batch tuvo porcentaje de adsorción de 24%.



Con el uso de las columnas de adsorción se observó una mejor eficiencia en la remoción de arsénico con la zeolita natural, no fue necesaria ninguna fuente de energía ya que el agua baja gracias a la acción de la gravedad, son fácilmente adaptables a casi cualquier material que se quiera usar como adsorbente, e incluso, permite la combinación de distintos materiales. Si se desea, se puede colocar una serie de columnas que supondrían una mayor eficiencia de remoción. No obstante, el material deberá ser remplazado cada cierto tiempo debido a su saturación, y el manejo y la disposición de dicho material representa algunas complicaciones. Una serie de columnas requeriría de un proceso más sofisticado, siendo complicado de replicar ya que sería necesario un alto costo inicial y requeriría personal capacitado.

El reactor batch, al desarrollarse en un sistema cerrado, la temperatura y la presión son controlables y no afectarían las reacciones ocurridas durante el proceso. La operación del reactor es continua y facilita el control automático de la producción. Al tratarse de experimentos a pequeña escala, la cantidad de energía utilizada fue mínima, esto sería una desventaja para operaciones industriales, ya que la cantidad de energía requerida sería mayor. La separación de ambas fases (adsorbato y adsorbente) requirió un tiempo de espera muy largo y esto pudo influir en los resultados obtenidos. Requiere un ciclo de operación complicado, de alto costo y personal capacitado.

## 9. CONCLUSIONES

- Según los estudios de Difracción de Rayos X y la Microscopia Electrónica de Barrido, la zeolita fue caracterizada de tipo clinoptilolita y sus elementos principales fueron el sílice, aluminio, calcio, sodio y potasio.
- En estudio petrográfico, la zeolita fue clasificada como una toba cristalina-lítica, de origen ígneo con alteración hidrotermal.
- Las isotermas de adsorción que mejor se ajustaron tanto en el sistema batch como en lecho empacado fue el modelo de Freundlich.
- Con respecto a las curvas de adsorción, el mejor resultado se dio con un espesor de zeolita de 15 centímetros, un tiempo promedio de 0.034 minutos y un porcentaje de remoción de 48.84%.



## *RECOMENDACIONES*

Se recomienda realizar un estudio que permita determinar el tipo de arsénico con el que se trabaja (+3 o +5), y poder determinar la relación que existe entre el pH y el porcentaje de adsorción del arsénico.



## REFERENCIAS

**Arreguin-Cortés, F.I., Chaves-Guillen, R., Soto-Navarro, P., (2009).** Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México. *Tlálloc AMH* 45

**Barrera-Prieto., Espino-Valdés M. S. y Herrera-Peraza E.. (2009):** Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia III*, 8–18.

**Caccavale, F., Iamarino, M., Pierri, F., & Tufano, V. (2011).** Control and Monitoring of Chemical Batch Reactors. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-195-0>

**Colina M.L. (2016).** Reducción de tamaño de partículas y tamizado de solidos. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia.

**Cheung, C.W.; Porter, J.F. y Mckay, G. (2001).** Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char. *Water Research*. 35(3), 605-612.

**Cheung, C.W.; Porter, J.F. y Mckay, G. (2000).** Elovich equation and modified second-order equation for sorption of cadmium ions onto bone char. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 75, 963-970.

**Cooney, D.O. (1999).** Adsorption design for wastewater treatment. 1<sup>a</sup> ed., Lewis Publishers, USA.

**Cruz, F. (1999).** Instrumentación, control y adquisición de datos de una columna de flotación. Retrieved from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/9122/Capitulo1.pdf>

**Cuevas, L., Herrera, M.L. & Santa María, L. (1991).** Métodos de microscopía electrónica de barrido. In: *Técnicas de inmunocitoquímica en microscopía electrónica*. (Durfort M., Vilaró S., Renau J. & Serratosa J., eds.). pp: 253-267. Barcelona, Universitat de Barcelona.



**Dandan L.; Cao Q. y Cao X. (2008).** Removal of Pb (II) using the modified lawn grass: Mechanism, kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *J. Hazard. Mater.*, 166(1), 239-47.

**Faust, S.D. y Aly, O.M. (1999).** *Chemistry of Water Treatment*. 2<sup>a</sup> ed., Lewis Publishers. USA.

**Francisca, F. M., & Carro Pérez, M. E. (2014).** Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 177–190.

**Freeman, H.M. (1989).** *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. 1<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill. Nueva York.

**García, B., Arnal, J. y Alandia, S. (2008).** Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de Moringa oleífera. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia, España.

**Gotkowitz, M., Ellickson, K., Clary, A., Bowman, G., Standridge, J., & Sonzogni, W. (2008).** Effect of well disinfection on arsenic in ground water. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 28(2), 60–67. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2008.00192.x>

**Implan (2015).** Estudios de soporte para la actualización 2015 del plan de desarrollo urbano Chihuahua 2040. Ayuntamiento Chihuahua. Dirección de Obras Públicas Municipales.



**Juang, R.S. y Chen, M.L. (1997).** Application of the Elovich Equation to the Kinetics of Metal sorption with solvent-Impregnated Resins. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, 813-820.

**Kuo, S. y Lotse, E.G. (1974).** Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. *Soil Science*. 116(6), 400-406.

**Marshall, W.E.; Champagne, E.T.; y Evans, W.J. (1993).** Use of rice milling by products (hull & bran) to remove metal ions from aqueous solution. *Journal of Environmental Science and Health Part A – Environmental Science and Engineering and Toxic and Hazardous Substance Control* 28 (9).

**Mathialagan, T. y Viraraghavan, T. (2003).** Adsorption of cadmium from aqueous solutions by Vermiculite. *Separation Science and Technology*. 38 (1), 57-76.

**Mazuelas, Estaban Angel (1992).** Caracterización por Difracción de Rayos X de lieteroestructuras de semiconductores 111 y su aplicacion al diseño de superredes tensadas para epitaxias de Gaas/Si. Centro Nacional de Microelectronica. Madrid.

**McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., Parvez, F. (2012).** Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment*, 429, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.051>

**Mejía–Zamudio J. L., Valenzuela–García, S. Aguayo–Salinas R. y Meza–Figuroa D. (2009)** Adsorción de arsénico en zeolita natural pretratada con óxidos de magnesio, *Rev. Int. Contaminación. Ambiental* Vol.25 No.4.

**Petkova-Simeonova, V. M., Rivera-Huerta, M.L., Piña-Soberanis, M. (2004)** Removal of Iron and Manganese by Adsorption on Nonconventional Conact Media. Final Report TC 9531. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México. 1995.



**Rivera, M., & Piña, M. (2005).** Tratamiento De Agua Para Remoción De Arsénico Mediante Adsorción Sobre Zeolita Natural Acondicionada. Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua., 1–11. Retrieved from <http://www.zeocat.es/docs/aguaarsenico2.pdf>

**Schnabel, R.R. y Potter, R.M. (1991).** Kinetics of sulfate retention on soil affected by solution pH and concentration. Soil Science Society of America Journal, 55, 693-698.

**Sendrós, C. (2004).** Modelización y Control de Temperatura de un Reactor “Batch” para un Proceso Químico Exotérmico. Sauron.Etse.Urv.Es, 191. Retrieved from <http://cde05.etse.urv.es/pub/pdf/675pub.pdf%5Cnhttps://sauron.etse.urv.es/public/PROPOSTES/pub/pdf/675pub.pdf>

**Smith, A.S., Lingas, E.O., Rahman, M., (1991).** Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. Bull. World Health Organ. 78, 1093–1103.

**Suzuki, M. (1990).** Adsorption Engineering. 1ª ed. Editoriales Kodansha y Elsevier, Tokio.

**Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, A. y Ruiz Paternina, E. (2016).** Adsorción de Ni (ii) por cáscaras de ñame (*Dioscorea rotundata*) y bagazo de palma (*Elaeis guineensis*) pretratadas. Revista Luna Azul, 42, 30-43. Recuperado de [http://200.21.104.25/lunazul/index.php?option=com\\_content&view=article&id=126](http://200.21.104.25/lunazul/index.php?option=com_content&view=article&id=126)

**Weber J, Smith E (1972)** Simulation and design models for adsorption process. Env. Sci.Technol. 21: 1040-1050.



## Brenda Magallanes Miranda

27 años

Chihuahua, Chih. México.

Calle Domajo #15308 Fracc. Quintas Quijote

Cel. 6141281759

e-mail miranda.brenda23@gmail.com

## HABILIDADES

- Trabajo bajo presión.
- Responsable
- Organizada.
- Actitud positiva

Español: Natal  
Inglés: Avanzado

-Programas manejados: AutoCad,  
ArcGis, CivilCad. Office.

-Noiones en: Paquetes contables.

## ESTUDIOS

2018  
Chihuahua-México

Maestría en Hidrología Subterránea  
Universidad Autónoma de Chihuahua

2014  
Chihuahua-México

Ingeniería Geológica  
Universidad Autónoma de Chihuahua

2008  
Chihuahua-México

Preparatoria  
Colegio de Bachilleres Del Estado de Chihuahua #10

## EXPERIENCIA LABORAL

De enero 2017-Actual  
Chihuahua, México

### Bachillerato del Real

Sector: Educación

Cargo: Docente

Tareas realizadas: Impartir asesorías de materias básicas como matemáticas, física y química a alumnos de secundaria y bachillerato. Enseñanza del idioma inglés en educación superior.

De febrero a diciembre 2015  
Chihuahua, México

### Servicio Geológico Mexicano, Centro Experimental Chihuahua

Sector: Investigación, Recursos naturales

Cargo: Analista de petrografía y mecánica de rocas.

Tareas realizadas: Realizar la descripción, nomenclatura, análisis e interpretación de muestras petrográficas minerales. Pruebas de resistencia de materiales (compresión, torsión, corrosión, etc.)

De enero a diciembre 2014  
Chihuahua, México

### Laboratorio de Sanitaria, Facultad de Ingeniería, UACH.

Sector: investigación, análisis de agua

Cargo: Laboratorista

Tareas realizadas: toma de muestras de agua residual, potable, uso recreativo, etc. Así como su análisis e interpretación.

De mayo a diciembre 2014  
Chihuahua, México

**PRONATURA Noreste**

**Sector: Medio ambiente**

**Cargo: Asistente de proyecto**

Tareas realizadas: Toma de muestras de roca, agua, suelo, flora, realización de análisis físicos y químicos de las muestras colectadas y así como su interpretación. Impartición de cursos. Implementación de medidas de reducción de impacto ambiental.

De enero 2013 a Marzo 2014  
Chihuahua, México

**Facultad de Ingeniería, Laboratorio de química**

**Sector: Educación**

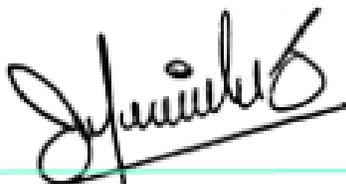
**Cargo: Laboratorista**

Tareas realizadas: Análisis físico-químicos de agua, calidad, muestreo de aguas tratadas, sistemas aerobios y anaerobios para recuperación de aguas. Brindar las clases prácticas de las materias de química a los alumnos.

## FORMACIONES ADICIONALES E INTERESES

---

- Diplomado de Inglés, Facultad de Filosofía y Letras, UACH.
- Presentación de tesis y diferentes investigaciones en congresos a nivel estatal y nacional.
  - Impartición de cursos sobre importancia del cuidado de agua, impacto ambiental, desarrollo sustentable, análisis químicos, etc., en apoyo a campañas ecológicas.
- Talleres de: Liderazgo en clase, Herramientas de trabajo para personas con TDAH y Control y manejo de conversaciones cruciales con padres de familia.



---

**M.I. Brenda Magallanes**

Domicilio Permanente: Dornajo #15308, Fraccionamiento Quintas Quijote  
Chihuahua, Chihuahua, Código 31136

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Brenda Magallanes Miranda.