



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

---

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE TOBA DE TEZOANTLA  
HIDALGO., COMO MATERIAL ADSORBENTE DE  
MANGANESO EN SOLUCIÓN ACUOSA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL

PRESENTA:

KAREN YAZMÍN MENESES SALAS

DIRECTORES

DR. FIDEL PÉREZ MORENO

DR. KINARDO FLORES CASTRO

Mineral de la Reforma, Hidalgo., 2018



Mineral de la Reforma, Hgo., a 08 de noviembre de 2018

Número de control: ICBI-D/860/2018  
 Asunto: Autorización de tesis

**M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Karen Yazmín Meneses Salas**, quien presenta el trabajo de **"Evaluación de Toba de Tezoantla, Hgo., como material absorbente de manganeso en solución acuosa"**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE: M. en C. Patricia Candelaria Montiel García

PRIMER VOCAL: Dr. Fidel Pérez Moreno

SEGUNDO VOCAL: Dr. Kinardo Flores Castro

TERCER VOCAL: Dr. Enrique Cruz Chávez

SECRETARIO: Dr. Julián Núñez Benítez

PRIMER SUPLENTE: Dr. Màrius Ramírez Cardona

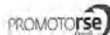
SEGUNDO SUPLENTE: Ing. José Alfredo Meneses Lugo

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
 "Amor, Orden y Progreso"

Dr. Oscar Rodolfo Suárez Castillo  
 Director del ICBI

ORSC/IVL



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

## *Dedicatoria*

*A mi familia, por ser las personas más maravillosas que siempre aportan algo bueno a mi vida, por su amor y cariño en todo momento, por ayudarme a crecer y ser mejor persona y sobre todo por siempre estar a mi lado.*

*¡Los Amo!*

*A mi padre y madre por apoyarme siempre, por sus regaños y consejos que fueron necesarios para formar la persona que soy.*

*A mi hermana Itzel por apoyarme en mis locuras, por ser mi confidente en todo y darme ánimos cuando lo necesito ¡Te amo peque!*

*A mi sobrino Diego, por ser mi inspiración y motivo a ser mejor persona, por hacerme reír y darme lecciones que solo un niño podría enseñarme.*

*A mi tía Oralia, mis primos Paula y Fidel por siempre estar conmigo, por mandarme mensajes de ánimo desde lejos, por apoyarme y sobre todo porque siempre comparten lo mejor de su vida conmigo.*

*Al Dr. Fidel Pérez Moreno por apoyarme en este trabajo, por su paciencia y por compartir su conocimiento conmigo.*

## *Agradecimientos*

*A mis directores de tesis por brindarme su apoyo durante la realización de este trabajo. Al Dr. Fidel Pérez Moreno, por su apoyo desde el inicio hasta el final, por compartir su conocimiento y enseñanzas conmigo, por su orientación, su paciencia y nobleza ¡muchas gracias! Al Dr. Kínardo Flores Castro por sus sugerencias, por aconsejarme y guiarme en la redacción de este trabajo.*

*Al Dr. Marius Ramírez Cardona por motivarme a realizar el trabajo de tesis y por ampliar mi visión en la geología ambiental.*

*Al Dr. Enrique Chávez Cruz por su tiempo, sus sugerencias, sus críticas constructivas y por ser paciente con mis dudas.*

*A la Mtra. Paty Montiel García por su paciencia, sus consejos, por escucharme y por el apoyo durante la redacción de este trabajo.*

*Al Dr. Julián Núñez Benítez por sus valiosos puntos de vista y sus sugerencias.*

*Al Ing. J. Alfredo Meneses por sus sugerencias para la mejora de mis mapas y su tiempo.*

*A Víctor, Citlalquetzalli, Esmeralda, Jorge, Raúl y Laura, por apoyarme y animarme siempre, por brindarme su amistad sincera y estar conmigo en las buenas y en las malas.*

*Este trabajo fue presentado en:*

*Evento: XXVIII Congreso Nacional de Geoquímica. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, Zacatecas. 1 al 5 de octubre del 2018.*

*Ponencia: Cantera de Tezoantla como adsorbente de mena de manganeso proveniente del Distrito Minero de Molango, Hidalgo, México.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
TABLA DE CONTENIDO .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación .....	4
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos .....	4
<b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. Historia minera del estado de Hidalgo .....	5
2.2 Consecuencias en el agua por actividad minera .....	6
2.2.1 Drenaje ácido de mina (DAM) .....	6
2.2.2 Erosión y sedimentación .....	6
2.2.3 Metales pesados y lixiviación .....	7
2.2.4 Contaminación del agua .....	12
2.2.5 Calidad del Agua .....	13
2.2.6 Usos del agua en México .....	13
2.2.7 Disponibilidad de agua a nivel mundial .....	13
2.3 Técnicas para el tratamiento de agua .....	14
2.3.1 Proceso de intercambio iónico .....	14
2.3.2 Proceso de adsorción .....	16
2.3.3 Zeolitas .....	17

<b>CAPÍTULO 3 MARCO GEOLÓGICO</b> .....	26
3.1 Fisiografía .....	26
3.2 Clima .....	26
3.3 Hidrografía .....	26
3.4 Suelos .....	26
3.5 Geología Regional.....	27
3.5.1 Grupo Pachuca .....	28
3.5.2 Geología Local .....	31
3.5.3 Deposición de desechos de cantera .....	32
 <b>CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA</b> .....	33
4.1 Localización geográfica y vías de acceso a la zona de estudio .....	33
4.2 Selección de las muestras de tobas para la evaluación de adsorción .....	35
4.3 Preparación de solución acuosa de caliza manganesífera. ....	38
4.4 Diseño de la columna de adsorción.....	38
4.5 Técnica espectrometría de absorción atómica .....	40
4.6 Análisis de muestras (ICP-AES).....	40
 <b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	42
 <b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES</b> .....	47
6.1 Recomendaciones y sugerencias.....	48
 <b>GLOSARIO</b> .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Diagrama de Pourbaix de Mn en medio acuoso (Carriazo et al., 2007) .....	9
<b>Figura 2.</b> Porcentaje del uso de agua en México (INEGI, 2011). .....	13
<b>Figura 3.</b> Unidades estructurales básicas de la zeolita (Curi <i>et al.</i> , 2006).....	17
<b>Figura 4.</b> Estructuras típicas de zeolitas a) Atómica, b) tetraédrica, c) cristalina .....	18
<b>Figura 5.</b> Unidades secundarias de construcción (SBU) (Giannetto et al., 1990) .....	19
<b>Figura 6.</b> Estructura de la Mordenita .....	20
<b>Figura 7.</b> Formaciones Geológicas que componen al Grupo Pachuca (Geyne et al. 1963)	31
<b>Figura 8.</b> Depósito de desechos de cantera y contaminación visual del paisaje.....	32
<b>Figura 9.</b> Ubicación Geográfica de la Cantera de Tezoantla en el estado de Hidalgo .....	34
<b>Figura 10.</b> Difractograma de rayos x de la muestra de Tezoantla (Sierra 2014).....	35
<b>Figura 11.</b> Muestra de toba TEZ-M4.....	37
<b>Figura 12.</b> Muestra TEZ-M-9. ....	37
<b>Figura 13.</b> Sistema de adsorción de Mn en columna. ....	39
<b>Figura 14.</b> Equipo Perkin Elmer Óptima 8300. ....	41



## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Dosis recomendada para ingesta de Mn (ATSDR, 2012) .....	11
<b>Tabla 2.</b> Principales fuentes de contaminación (FEA, 2006). .....	12
<b>Tabla 3.</b> Tratamientos de agua para alcanzar la calidad deseada.....	14
<b>Tabla 4.</b> Clasificación estructural de zeolitas según Meier (1968).....	19
<b>Tabla 5.</b> Tipos de yacimientos de zeolitas de acuerdo a su origen (Costafreda, 2011) .....	22
<b>Tabla 6.</b> Distribución de especies de zeolitas en México (Ostrooumov, 2006) .....	23
<b>Tabla 7.</b> Zeolitas más usadas en el tratamiento de agua (Ostromooumov, 2006) .....	24
<b>Tabla 8.</b> Perfil de la cantera de Tezoantla Hgo (Vázquez, 2016). .....	36
<b>Tabla 9.</b> Concentración y porcentaje de adsorción de Mn <sup>2+</sup> en toba dacítica malla 10.....	42
<b>Tabla 10.</b> Comparación de pH inicial y final y concentración de Mn <sup>2+</sup> en mg/l. ....	43
<b>Tabla 11.</b> Elementos mayores de la solución de caliza manganesífera en mg/l. ....	44
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de adsorción y concentración en mg/l. ....	45

## INDICE DE GRÁFICAS

	Página
<b>Gráfica 1.</b> Porcentaje de adsorción en Toba Dacítica # 14.....	45

## RESUMEN

El presente trabajo consistió en evaluar la capacidad de adsorción de una toba dacítica proveniente de la cantera de Tezoantla, Hidalgo., para la retención de  $Mn^{2+}$  en solución acuosa, realizada a partir de la disolución de una caliza manganesífera del tajo Naopa, ubicado en la región de Molango de Escamilla, Hidalgo. La concentración de  $Mn^{2+}$  en la solución de caliza manganesífera fue de 246.92 mg/l la cual se puso en contacto con un lecho de toba de 50 g de malla 10 (1.68-2.0 mm) en volúmenes de 60 ml/hora a flujo continuo. Los resultados de las pruebas preliminares en la evaluación de adsorción de la toba no presentaron retención, debido a la presencia de otros iones ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  etc.), en la solución y a la alta concentración de  $Mn^{2+}$ , por ello se realizó una precipitación a la solución de caliza manganesífera en medio básico con NaOH y se filtró para disminuir la concentración de los iones interferentes y también de  $Mn^{2+}$  (174.2 mg/l) que fue coprecipitado; esta última concentración de  $Mn^{2+}$  se utilizó para realizar una nueva prueba y evaluar la capacidad de adsorción de la toba dacítica en columna, utilizando la misma cantidad de toba pero de malla 14 (1.41-1.68 mm). Los resultados de esta prueba para las primeras 4 horas presentaron un 96.9 % de retención de  $Mn^{2+}$ , sin embargo la capacidad de la toba es de 0.06 meq/g cantidad muy pequeña para ser considerada de buena capacidad, ya que lo ideal es de 1 - 2 meq/g.

## ABSTRACT

The deal consisted in evaluate the adsorption capacity of a dacitic tuff from Tezoantla quarry, Hidalgo, for the retention of  $Mn^{2+}$  in aqueous solution, from the dissolution of a manganese limestone of the Naopa pit, located in the region from Molango de Escamilla, Hidalgo. The concentration of  $Mn^{2+}$  of the solution was 246.92 mg/l which was put in contact with a bed of 50 g tuff, 10 net (1.68-2.0 mm) in volumes of 60 ml / hour in continuous flow. The results of the preliminary test of the adsorption evaluation did not present retention, such as the presence of other ions ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  etc.), in the solution and at the high concentration of  $Mn^{2+}$ , therefore the solution of manganese limestone was precipitated in basic medium with NaOH and filtered to reduce the concentration of the interfering ions and also of  $Mn^{2+}$  (174.2 mg/l) that was co-precipitated; this last concentration of  $Mn^{2+}$  was used to perform a new test and evaluate the capacity of adsorption of dacitic tuff column, using the same amount of tuff but 14 net (1.41-1.68 mm). The results of this test for the first 4 hours (480 ml) present 96.9 % retention of  $Mn^{2+}$ . However, the capacity of the tuff is 0.06 meq/g very small amount to be considered as good capacity; ideally is 1 - 2 meq/g.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para la conservación de la vida, no tiene sustituto y no se conoce forma de vida que prescindiera de ella. En los últimos años la calidad del agua no es buena debido al aumento de elementos contaminantes en cuerpos de agua, en México gran parte de las fuentes que abastecen agua contienen manganeso y hierro, los cuales se encuentran de forma soluble que al oxidarse en el momento de la cloración o con el oxígeno del aire se precipitan generando un color obscuro lo cual ocasiona una serie de problemas de carácter técnico, económico y social; el manganeso y hierro son dos elementos similares que pueden encontrarse en las aguas naturales, ya que son el decimoséptimo y cuarto elemento más abundantes en la Tierra respectivamente; estos se no se consideran peligrosos, sin embargo si exceden las dosis recomendadas por la OMS (Organización Mundial de la Salud), EPA (Agencia de Protección Ambiental) y USDA por sus siglas en inglés (*United States Department of Agriculture*) representan un riesgo para la salud (FEA, 2006); (Petkova, 1997).

Por estas razones se han desarrollado diferentes técnicas en el tratamiento de agua, una de ellas es la adsorción a través de materiales porosos o intercambiadores iónicos, los cuales pueden ser eficaces en la eliminación de elementos presentes en agua; la toba dacítica de Tezoantla Hgo, que se explota para usos ornamentales y de construcción, cumple con las características mencionadas anteriormente, cabe destacar que este material se encuentra de forma natural y en forma de desecho minero, por lo que es económico y se puede aprovechar como material adsorbente en el tratamiento de agua, no sin antes evaluar las condiciones del agua por ejemplo pH, temperatura, elementos mayoritarios y traza, sólidos totales disueltos etc., dependiendo de estas características se debe acondicionar el material adsorbente utilizado es decir, se debe seleccionar la granulometría, la cantidad y el tratamiento químico o físico que se le debe dar para mejorar su eficiencia de adsorción (Arboleda, 1972).

## 1.1 Antecedentes

Barrón en 2003 caracterizó y evaluó una toba riolítica alterada a zeolita de Tezoantla, Hgo, como intercambiador iónico de níquel, plomo y zinc en solución acuosa; activó la zeolita con NaCl. En las pruebas de adsorción se obtuvieron resultados de retención de 33.94 % para zinc, 47.83 % para níquel y 90.14 % plomo.

Leyva y colaboradores en 2005 usaron clinoptilolita colectada de un yacimiento de San Luis Potosí como intercambiador iónico de plata en solución acuosa, probando valores de pH de 3-7 a diversas temperaturas de 25-35 °C; pH y temperatura no tuvieron influencia sobre el intercambio iónico obteniendo un 70 % retención de plata en clinoptilolita.

Piña y colaboradores en 2012 evaluaron la capacidad de adsorción de la zeolita clinoptilolita proveniente de Culiacán Sinaloa que pusieron en columnas de 60 y 70 cm, para la remoción de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  en fuentes de agua subterránea de abastecimiento público para plantas tratadoras de Sonora, Veracruz, Chihuahua, Sinaloa y Texcoco obteniendo resultados de 95 % de retención de ambos elementos, utilizando pre-tratamientos en el agua como la oxidación, cloración aireación entre otros.

Cuchimaque y colaboradores en 2013, realizaron pruebas de adsorción con zeolita tipo clinoptilolita de Colombia para retener  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  en forma simultánea, donde las condiciones de pH de la solución acuosa influyeron en la remoción; para  $\text{Fe}^{2+}$  un pH mayor a 7 formo precipitado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lo que redujo la retención ambos iones debido a que el precipitado no fue filtrado antes del proceso de adsorción con el material zeolítico; los resultados de adsorción no fueron favorables para ambos elementos.

Mendoza y colaboradores en 2014 realizaron un estudio sobre la incorporación y retención de plomo en zeolita tipo chabasita de un yacimiento ubicado en el estado de Sonora, donde una parte de zeolita se activó con tratamiento térmico y otra no, los resultados obtenidos de capacidad de adsorción fueron de 80 % para la zeolita sin tratamiento térmico y 90.6 % para la zeolita con tratamiento térmico.

Sierra y colaboradores en 2014 mencionan la eficacia de adsorción de plomo y cromo en solución acuosa en una zeolita de especie mordenita, contenida en toba dacítica de Tezoantla, Hgo. La experimentación se realizó en columnas de adsorción y en pruebas de adsorción en *batch*, donde se obtuvo un 90 % y 95 % de retención para plomo y cromo respectivamente.

Islas y colaboradores en 2014 evaluaron las propiedades físico-químicas, de la toba dacítica de Tezoantla, Hgo., que contiene zeolita de especie mordenita, para darle usos alternativos a los residuos mineros de la cantera de Tezoantla Hgo, destacando entre ellos su uso en la filtración de aguas contaminadas.

Montiel e Ibinarriaga en 2016 evaluaron la capacidad de intercambio iónico de la zeolita de especie clinoptilolita proveniente del estado de Oaxaca para la retención de  $Mn^{2+}$  divalente en solución acuosa, con diferentes soluciones de  $MnCl_2$  con un pH entre 4 y 6, donde la zeolita retuvo  $Mn^{2+}$  en las primeras 24 horas, sin que el pH tuviera una influencia significativa en el proceso de retención.

Huanca y colaboradores en 2018 caracterizaron zeolitas naturales de Perú, para la remoción de Pb II en una solución de laboratorio. Las pruebas de adsorción en función del tiempo y a diferentes concentraciones demostraron que el material zeolítico tiene afinidad por el catión Pb (II), ya que el proceso de remoción en función del tiempo muestra de 53,9% de remoción en las primeras 4 horas de contacto.

Córdova y colaboradores en 2018 evaluaron la capacidad de adsorción para cromo en columna de lecho fijo de zeolita de especie mordenita, del yacimiento de Palmarito Cuba, triturada en granulometrías de 0.85, 0.9 y 0.315 mm; la capacidad de adsorción fue mayor en granulometrías menores a 1.0 mm, mientras que los tamaños superiores a 1.0 mm resultaron poco eficientes.

## 1.2 Justificación

En la actualidad el agua dulce es un recurso renovable limitado debido al crecimiento exponencial de la población y a la expansión industrial, lo que ha ocasionado la contaminación de cuerpos de agua, debido a esta problemática se han desarrollado técnicas para su posible potabilización haciendo usos de materiales naturales porosos. En el estado de Hidalgo existe el caso del municipio Molango de Escamilla Hgo, en donde el  $Mn^{2+}$  se encuentra de forma natural en suelos y rocas, en forma disuelta debido a los procesos de explotación minera, provocando la contaminación de cuerpos de agua. El Mn es toxico a exposición prolongada y tiene efectos negativos a la salud por ello, en este trabajo se evaluará la capacidad de adsorción de toba dacítica proveniente de Tezoantla, Hgo., que contiene zeolita de especie mordenita sódica para una solución de caliza manganesífera que contiene altas concentraciones de  $Mn^{2+}$  y otros iones asociados como el  $Fe^{2+}$  y  $Al^{3+}$ . La toba estudiada se encuentra en forma natural y como residuo de explotación minera que por sus características de porosidad, adsorción y capacidad de intercambio iónico, podría tener un uso como material adsorbente en el tratamiento de agua.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Evaluar toba de Tezoantla Hidalgo como material adsorbente de manganeso en solución acuosa de caliza manganesífera.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Experimentar la capacidad de adsorción con dos granulometrías de toba dacítica activada y sin activar para la remoción de  $Mn^{2+}$  en solución acuosa de caliza manganesífera.
- Experimentar en una solución acuosa de caliza manganesífera precipitada y sin precipitar el comportamiento del ion  $Mn^{2+}$  en el proceso de adsorción utilizando una toba dacítica.

Evaluar la capacidad de adsorción de la toba de Tezoantla Hidalgo como material adsorbente de manganeso en solución acuosa de caliza manganesífera.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

### 2.1. Historia minera del estado de Hidalgo

La minería es una actividad económica que ha estado presente en el proceso histórico de México, la minería mexicana o americana inicia con el período de la conquista española, sin embargo existen abundantes indicios acerca de los conocimientos minero-metalúrgicos de los pueblos prehispánicos.

Los minerales empleados por los indígenas fueron recogidos y extraídos en explotaciones mineras formales, lo que implicaba un conocimiento mínimo de técnicas por ejemplo, se tienen estudios de los depósitos de obsidiana del Cerro de las Navajas en el estado de Hidalgo o la extracción de cobre en el cerro del Águila del estado de Guerrero, en éstos y muchos otros lugares de México se han encontrado restos de los trabajos mineros que los indígenas realizaron empleando el método de torrefacción es decir, calentando la pared rocosa y fraccionándola por medio del enfriamiento súbito con agua (Muñoz, 1986).

El estado de Hidalgo se caracteriza por su actividad minera desde hace más de 500 años, es una de las entidades federativas más importantes en el desarrollo de esta actividad en México, se explotan principalmente minerales metálicos de importancia económica como Oro (Au), Plata (Ag), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn) y Cobre (Cu) entre otros; sin embargo también se explotan otros minerales no metálicos principalmente de canteras y otras sustancias para la industria cementera incrementando la potencialidad minero-económica del estado. Actualmente el estado es un importante productor de manganeseo (Mn) en el país y ocupa el tercer lugar en la producción de cadmio (Cd) y en menor proporción de Au, Ag, Pb y Zn (SGM, 2016).



## 2.2 Consecuencias en el agua por actividad minera

La minería es el proyecto de mayor consumo de agua y es su mayor fuente de contaminación alterando el nivel freático y desplazando aguas subterráneas; el agua superficial y subterránea se contamina con sales minerales, sulfatos nitratos metales pesados etc.

### 2.2.1 Drenaje ácido de mina (DAM)

El drenaje ácido de mina es el agua residual producto de los procesos de extracción y producción minera; este se produce cuando los sulfuros presentes en las rocas que son excavadas por las actividades mineras quedan a la intemperie y entran en contacto con el agua y aire formando ácido sulfúrico que puede disolver a su vez otros metales tóxicos que se encuentran en las rocas. Los contaminantes de roca natural son liberados al medio ambiente de las menas expuestas y la roca estéril; tales contaminantes incluyen un pH excesivamente alto o bajo, metales como aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, cobalto, hierro, plomo, manganeso, mercurio, molibdeno, entre otros así como constituyentes radioactivos como uranio, torio, potasio-40, radiación alfa y beta en general (Aduvire, 2006).

En adición a los componentes de la roca, las aguas de mina son sistemáticamente contaminadas con cianuro, carbón orgánico, aceites y grasas, compuestos orgánicos, explosivos químicos de proceso, combustibles, anticongelante, herbicidas y pesticidas. Si este drenaje no se controla, puede tener contacto con otros cuerpos de agua; se infiltra en el suelo contaminando mantos acuíferos y que al ser utilizada para consumo humano puede producir intoxicaciones en diferente grado (Wayne, 2002).

### 2.2.2 Erosión y sedimentación

El desarrollo minero perturba el suelo y las rocas en el transcurso de la construcción y mantenimiento de caminos, basureros y excavaciones a la intemperie. Por la ausencia de prevenciones adecuadas y estrategias de control, la erosión de la tierra expuesta puede transportar una gran cantidad de sedimentación a arroyos, ríos y lagos. La sedimentación

excesiva puede obstruir riveras, la vegetación de estas, el hábitat para la fauna y organismos acuáticos (Castro, 2013).

### 2.2.3 Metales pesados y lixiviación

Los metales pesados son aquellos elementos de peso atómico alto y que presentan alta toxicidad aun en concentraciones bajas, están presentes en la naturaleza como componentes de la corteza terrestre en forma de óxidos o sulfuros y pueden formar sales solubles por condiciones favorables de pH, oxígeno, agua, presión y temperatura, los cuales hacen que se incremente el contenido de estos elementos en suelo, agua, aire, flora y fauna. Las actividades industriales, mineras, agrícolas, ganaderas y el tráfico de autos incrementan la emisión de metales al ambiente. En el caso de la minería la contaminación por metales pesados es causada cuando metales como, cobalto, cobre, cadmio, plomo, plata y zinc o metaloides como arsénico que están contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas de una mina entran en contacto con el agua, está oxida y/o disuelve los elementos presentes de rocas de mena infiltrándose a mantos acuíferos (Reyes *et al.*, 2016; Alcalá *et al.*, 2009).

La lixiviación es el proceso mediante el cual se disuelve un elemento desde el mineral o roca que lo contiene, los lixiviados son líquidos que se forman como resultado de pasar o “percolarse” a través de un sólido, el líquido va arrastrando distintas partículas de los sólidos que atraviesa. Por lo general suele tener altas concentraciones de nitrógeno, hierro, cloruros, fenoles y manganeso. También puede incluir otros productos químicos como metales pesados, pesticidas o solventes. Dependiendo de su composición está el grado de toxicidad, los lixiviados pueden contaminar el ecosistema sobre todo si se filtran a aguas superficiales y/o subterráneas (Reyes *et al.*, 2016; Alcalá *et al.*, 2009).

La población expuesta a estos contaminantes por inhalación e ingestión aún en cantidades mínimas pero durante un largo periodo puede causar daños a la salud; se incrementa el riesgo de aparición de tumores, enfermedades en órganos vitales como aparato digestivo, respiratorio y reproductivo (Ferré *et al.*, 2006).

### 2.2.3.1 Manganeso

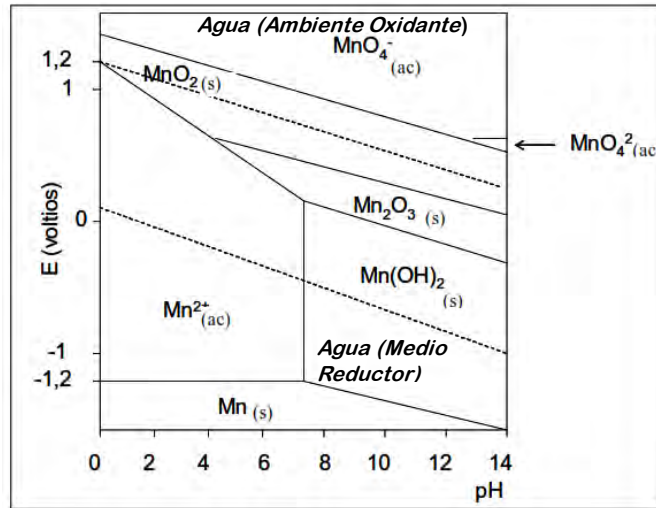
El manganeso es el principal contaminante en la zona de estudio y se puede encontrar en el suelo aire y agua; su símbolo químico es Mn, es un elemento sólido metálico de aspecto plateado y fácilmente oxidable de número atómico 25, tiene masa atómica de 54,938 g/mol y posee una densidad de 7.2 g/ml; su punto de fusión es de 1246 °C y el de ebullición es de 2150 °C, se sitúa en el grupo VII de la tabla periódica (Lenntech, 2017).

El manganeso está presente en un 0.09 % en la corteza terrestre, 0.02 % en el manto y 0.0004 % en el agua del océano, sin embargo no se encuentra de forma nativa excepto en los meteoritos, está asociado a otros elementos como oxígeno, azufre y cloro; su mineralogía es muy diversa debido a la variación de sus estados de oxidación de 1+ hasta 7+, siendo los más comunes 2+, 4+ y 7+, éstos forman óxidos, hidróxidos carbonatos y sulfuros entre otros (INCYTH, 2003).

El equilibrio de todas las formas de manganeso en medio acuoso está influenciado por el pH, predominando  $Mn^{2+}$ ,  $MnCO_3$ ,  $MnO_2$  y  $MnS$ , siendo poco comunes los carbonatos ácidos, sulfatos y cloruros de manganeso.

El Mn se oxida con facilidad en presencia de aire formando una capa de óxido color castaño, es fácilmente soluble en agua que contenga  $CO_2$  y es transportado en solución bajo condiciones reductoras y ácidas.

La química del manganeso en solución acuosa es compleja y está influenciada por variación de temperatura, pH y potencial redox; el manganeso no disuelto puede encontrarse asociado a materia orgánica u otros metales y cuando el potencial de reducción disminuye lo suficiente el Mn en estado de oxidación 3+ y 4+ pasa a su estado de oxidación 2+, que es el de mayor solubilidad en agua como se observa en la figura 1 (Carriazo *et al.*, 2007).



**Figura 1.** Diagrama de Pourbaix de Mn en medio acuoso (Carriazo *et al.*, 2007).

Cuando el Mn metálico reacciona con ácidos, se libera hidrógeno y se forma una sal de manganeso (equilibrio 1), también reacciona a temperaturas elevadas con halógenos, azufre, nitrógeno, carbono, silicio, fósforo y boro (equilibrio 2) (Santander, 2015).



Los minerales de mena del manto manganífero son principalmente del tipo carbonatos y óxidos de manganeso; las fases minerales carbonatadas consisten principalmente de rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ) y manganocalcita ( $\text{Ca, Mn} \text{ CO}_3$ ) en cantidades subordinadas y la pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) como especie oxidada. Los minerales de ganga que acompañan a los de mena son esencialmente: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

La mineralogénesis del manganeso se presenta en contextos ígneos plutónicos y en vulcanismo submarino que está asociado a los fluidos hidrotermales que le acompañan; en ambientes sedimentarios son comunes en cuencas y dorsales oceánicas en donde la materia orgánica, la actividad bacteriana, el pH, potencial redox (Eh) y la baja concentración de

oxígeno en la columna de agua condicionan la estabilidad de las fases minerales y el equilibrio químico (Flores, 2015).

La mineralogía del manganeso es complicada debido al gran número de óxidos e hidróxidos formados, en los que habitualmente se produce la sustitución de  $Mn^{2+}$  y  $Mn^{3+}$  por  $Mn^{4+}$ . Cuando el número de oxidación de una cantidad suficiente de iones ha sido cambiado, la estructura se transforma en inestable apareciendo una nueva fase. Las sustituciones producen cambios en la longitud medida del enlace  $Mn-O$  con el subsiguiente cambio en el tamaño de la celda unidad, y vienen acompañadas por la sustitución de algunos  $-O^-$  por  $OH^-$  para obtener la neutralidad de carga.

Estas especies mineralógicas se encuentran en cientos de minerales aunque sólo algunos tienen interés industrial, entre ellos destacan la Pirolusita  $MnO_2$ , Hausmannita  $Mn_3O_4$ ,  $MnO_2 \cdot H_2O$ , Manganita  $MnO(OH)$ , Braunita  $3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$ , Birnesita ( $Mn_7O_{13} \cdot 5H_2O$ ).

Los carbonatos de Mn son minerales que se caracterizan por su homogeneidad y consistencia en el análisis químico; el carbonato de manganeso más importante es la Rodocrosita ( $MnCO_3$ ) que contiene 61.7 % de Mn. Otros tipos de carbonatos son la Kutnahorita  $CaMn(CO_3)_2$  y la Manganocalcita  $(Mn,Ca)CO_3$ ; también se han encontrado en nódulos marinos, en donde el contenido en manganeso oscila entre 40 y 50 %. La Pirolusita junto con la Rodocrosita, son la principal mena de manganeso; sin embargo, en ocasiones se forman minerales de manganeso como producto de la oxidación de mineralogía primaria (Bender, 1972).

El principal silicato de Mn es la Rodonita ( $Mn^{2+}$ )  $SiO_3$ , como se muestra en la que tiene 54 % de Mn, frecuentemente se encuentra relacionado a la Rodocrosita.

El sulfuro de Mn más conocido es la especie Alabandita ( $MnS$ ), y contiene 63 % de Mn.

Los principales usos del manganeso son en la producción de acero que mejora su dureza, rigidez y solidez, en la industria siderúrgica se usa como agente reductor para disminuir el

contenido de oxígeno y/o azufre en los altos hornos para producir aceros, en la industria de las ferroaleaciones que fabrican ferromanganeso (76 % Mn y 24 % Fe) y silicomanganeso (76 % Mn y 24 % SiO<sub>2</sub>), también como aditivo en la gasolina para mejorar el grado de octanaje (CAMIMEX, 2012).

Desde el punto de vista fisiológico, el manganeso es conceptualizado como un elemento esencial para las especies animales que lo consumen en pequeñas cantidades en alimentos o en agua para mantenerse sanos denominándose por esta razón oligoelemento; el manganeso posee un rol bioquímico como activador de enzimas por ejemplo la hidrolasa, quinasa, descarboxilasa y transferasa; no obstante también se considera un problema asociado a los riesgos para la salud humana relacionados con la deficiencia de manganeso y por la toxicidad del mismo (Williams, 2012). Su consumo en altas cantidades puede causar graves problemas de salud y daños al cerebro que disminuye las capacidades motoras de las personas; en niños se ha observado que la exposición a niveles altos de manganeso puede alterar el desarrollo del cerebro que afecta el comportamiento y la capacidad de aprender y memorizar, en animales produce efectos en el sistema nervioso y reproductivo, por lo que las dosis recomendada promedio según instituciones como la OMS, EPA y USDA se muestra en la tabla 1 (DLEP, 2017).

**Tabla 1.** Dosis recomendada para ingesta de Mn (ATSDR, 2012).

<b>Organización</b>	<b>*D.R (mg)</b>	<b>*L.P Agua (mg/L)</b>
EPA	2.6	0.15
USDA	2.6	0.15
OMS	2	0.15
NOM-127-SSA-2000	-	0.15

\*D.R es dosis recomendada

\*L.P Límite Permisible

La gravedad por inhalación de manganeso depende del tamaño de partícula ya que este influye en la deposición del tracto respiratorio; existe evidencia de los efectos neurológicos clínicos y subclínicos del Mn, aunque no se conoce bien el proceso por el cual el Mn llega y se mueve a través del sistema nervioso central. Las exposiciones elevadas pueden dar lugar a síntomas y signos neurotóxicos severos, algunos de los cuales se parecen a los de la

enfermedad de Parkinson; este síndrome puede tener manifestaciones psiquiátricas y se conoce con el nombre de manganismo. Los síntomas clínicos, tales como trastornos del movimiento y disfunción neurológica, generalmente se han descrito en exposiciones superiores a  $5 \text{ mg/m}^3$  (ATSDR, 2012).

#### 2.2.4 Contaminación del agua

La contaminación del agua se define como la adición de sustancias que deterioran su calidad de tal forma que deja de ser apta para el uso al que se le ha designado y que puede tener un efecto dañino para cualquier ser vivo que la consume (JCA, 2003; Barba, 2002).

Es importante mencionar que el agua contiene diversas sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella desde el momento en que se condensa hasta que posteriormente el agua en forma de lluvia disuelve componentes químicos de sus alrededores y a medida que cae a través de la atmósfera; contiene organismos vivos microscópicos (patógenos) que pueden causar enfermedades. Por otro lado el agua subterránea que está en contacto con roca caliza por ejemplo, puede tener altas concentraciones de bicarbonatos o carbonatos de calcio que ocasionan dureza y por ello puede requerir un tratamiento previo a su uso (Price, 2003).

En México, la comisión nacional del agua reporta que la agricultura y la industria (la minería) son las responsables de la mayoría de los contaminantes emitidos a los cuerpos de agua y menos del 25 % del agua residual es tratada. En la tabla 2 se presentan las principales fuentes de contaminación (FEA, 2006).

**Tabla 2.** Principales fuentes de contaminación (FEA, 2006).

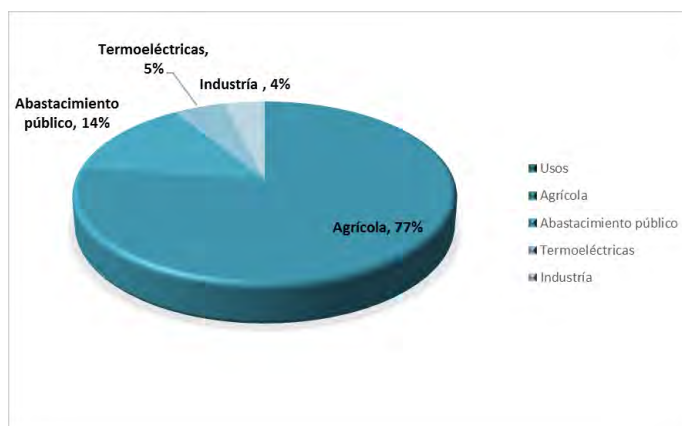
<b>Prácticas agrícolas</b>	<b>Urbanización</b>	<b>Descargas industriales</b>	<b>Sector pecuario</b>
Los principales contaminantes son pesticidas, llevados hasta ríos por lluvia y erosión del suelo	Descargas de residuos, de origen doméstico y público que constituyen el agua residual municipal.	Descargas generadas por las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usados como bienes de consumo y satisfactores para la población.	Constituido por los efluentes de las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado

### 2.2.5 Calidad del Agua

La calidad del agua es la condición general que permite que se emplee para usos concretos, por ejemplo para consumo humano, doméstico y/o de riego etc. Para consumo humano el agua debe ser salubre por lo que no debe contener microorganismos, sustancias químicas tóxicas o radioactivas que puedan representar una amenaza para la salud, además debe ser inodora incolora e insípida (FEA, 2006).

### 2.2.6 Usos del agua en México

En México el 77 % del agua se utiliza en la agricultura; 14 % en el abastecimiento público; 5 % en las termoeléctricas y 4 % en la industria como se muestra en la figura 2 (INEGI, 2011).



**Figura 2.** Porcentaje del uso de agua en México (INEGI, 2011).

### 2.2.7 Disponibilidad de agua a nivel mundial

Aproximadamente el 97.0 % de la provisión mundial de agua se encuentra en los océanos; el 3.0 % restante es agua dulce, pero más del 78 % de esta cantidad está confinada en los bancos de hielo polares, en suelo, formaciones rocosas y en la atmósfera lo cual deja menos del 22 % de agua disponible en la superficie y subsuelo. Desafortunadamente, el acceso a más del 99 % de esta agua superficial y subterráneas no es fácil y dependemos del 1.0 % que está disponible (aproximadamente 0.003 % de la cantidad mundial) para abastecer de agua a más de 7,000 millones de habitantes (Price, 2003).



## 2.3 Técnicas para el tratamiento de agua

Además de las medidas preventivas que se utilizan con el propósito de mantener los cuerpos de agua libre de contaminación como son la educación e información, existen técnicas físicas y químicas para el tratamiento del agua contaminada que generalmente se divide en tres etapas o tratamientos: primario, secundario y terciario (JCA, 2003).

En forma general en la primera etapa del tratamiento de agua se adicionan agentes floculantes como el sulfato de aluminio que produce una aglutinación de las partículas contaminantes: estas partículas caen por gravedad y se pueden separar por decantación. En la segunda etapa se filtra el agua para separar las partículas de mayor tamaño y eventualmente se adiciona carbón activado para eliminar las sustancias que dan mal sabor y olor. Finalmente se agrega cloro para eliminar los microorganismos que puedan estar presentes. Hay diferentes técnicas que se utilizan en las etapas del tratamiento de agua y se pueden utilizar o combinar dependiendo el grado de contaminación que tenga el agua, cabe destacar que en el tratamiento de agua se usan diversos materiales adsorbentes como carbón activado, resinas adsorbentes y de intercambio iónico, óxidos metálicos, diatomitas y zeolitas, entre otros. En la tabla 3 se muestran los más comunes.

**Tabla 3.** Tratamientos de agua para alcanzar la calidad deseada.

<b>Tratamiento primario</b>	<b>Tratamiento secundario</b>	<b>Tratamiento terciario</b>
Cribado	Lodos activados	Micro filtración
Sedimentación	Lagunas de aireación	Precipitación y coagulación
Flotación	Estabilización por contacto	Adsorción
Separación de aceites	Filtros biológicos	Intercambio Iónico
Homogeneización	Discos biológicos	Ósmosis Inversa
Neutralización	Tratamientos anaerobios	Electrodialisis
		Cloración y ozonización

### 2.3.1 Proceso de intercambio iónico

La propiedad de intercambio iónico se ha observado en minerales de silicatos cristalinos como arcillas, feldspatos y zeolitas, se considera una propiedad intrínseca de estos elementos que es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos; en el caso de las zeolitas esta sustitución ocurre por

átomos tetravalentes de aluminio lo que produce una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad de intercambio iónico que también es una manifestación de su naturaleza de estructura cristalina micro porosa, pues las dimensiones de sus cavidades de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

El comportamiento de intercambio iónico en las zeolitas depende de varios factores que determinan su selectividad: naturaleza de los cationes en solución, temperatura, concentración, asociación aniónica, disolvente (agua y solvente orgánico) topología y densidad de la red (Curi *et al.*, 2016).

Cuando el intercambiador iónico es sólido posee en su estructura cargas negativas y será capaz de retener e intercambiar iones cargados positivamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio catiónico (Equilibrio 3).



Donde  $R^-$  representa al intercambiador catiónico,  $A^+$  al catión intercambiable del sólido y  $B_s^+$  al catión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por su simplicidad se ha representado al catión como monovalente pero puede tener cualquier carga.

Cuando el intercambiador iónico sólido posee en su estructura cargas positivas será capaz de retener e intercambiar iones cargados negativamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio aniónico (Equilibrio 4).



Donde  $R^+$  representa al intercambiador aniónico,  $A^-$  al anión intercambiable del sólido y  $B_s^-$  al anión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al anión como monovalente pero puede tener cualquier carga.

### 2.3.2 Proceso de adsorción

En las interfaces de un sistema, la concentración de la sustancia (ya sea líquida o gaseosa) en la superficie es mayor que en el volumen total. Este fenómeno se llama sorción y la sustancia (ya sea líquida o gaseosa) en la cual se efectúa dicho fenómeno es el sorbente. La sorción abarca varios fenómenos, entre los más importantes destacan la absorción y la adsorción.

La absorción es el proceso en el cual la sustancia es succionada hasta el interior del sorbente y allí mantenida, por ejemplo la disolución de un gas en un líquido.

La adsorción es la remoción por adherencia de las impurezas de la sustancia en la superficie (que incluye los poros o superficie interna) del sorbente (interface entre las dos fases). Este proceso es necesario para una planta purificadora de aguas; Se puede representar con la siguiente reacción química:



Donde  $B_s$  es el adsorbato o sustancia neutra adsorbida, R es el adsorbente y RB es la interacción del compuesto con el adsorbente (Ponce, 2005).

#### 2.3.2.1 Materiales adsorbentes

Los materiales sólidos empleados como adsorbentes pueden ser naturales o sintéticos, en cualquiera de los casos su proceso de fabricación debe asegurar un desarrollo superficial poroso, no obstante un adsorbente ideal debe ser de bajo precio, tener una resistencia mecánica y química, debe ser abundante, de fácil manejo, con alta capacidad de adsorción y superficie específica.

Los adsorbentes comúnmente usados son el carbón activado, alúmina activada, arenas y zeolitas. Estos adsorbentes son previamente tratados y una vez utilizados deben regenerarse para recuperar sus propiedades.

Se sabe que las zeolitas naturales son minerales con propiedades únicas como su estabilidad, contenido de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) intra-cristalinos y porosidad que las hacen un medio de filtración, adsorbente e intercambiador iónico ideal para la purificación de agua, ya que está demostrado su capacidad de adsorción, filtración e intercambio catiónico (Carbotecnia, 2014).

### 2.3.3 Zeolitas

El término zeolita viene del griego *zéo* y *líthos* que quiere decir piedra que hierve o piedra efervescente. En 1756, con el descubrimiento de la stibilita por el mineralogista sueco Barón Alex Frederick Consted, las zeolitas fueron reconocidas por primera vez como un mineral de la familia de los aluminosilicatos con partículas de elementos alcalinos y/o alcalino-térreos adheridas y moléculas de agua como parte de su estructura. La fórmula empírica de una zeolita es:  $\gamma\text{M}_{2/n}\text{O} \cdot \text{xAl}_2\text{O}_3 \cdot \gamma\text{SiO}_2 \cdot \text{zH}_2\text{O}$

Dónde:

M es catión de intercambio iónico

$n$  es valencia del metal.

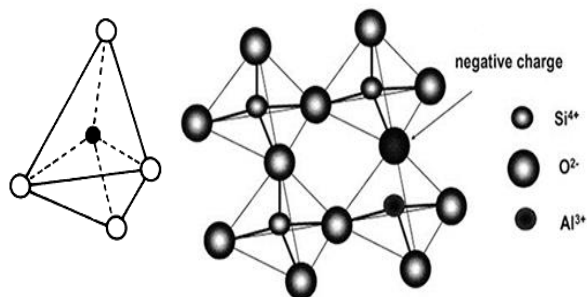
$x$  es número de moléculas de alúmina el (2 a 10).

$\gamma$  es número de moléculas de sílice (2 a 8), y moléculas de óxido metálico.

$z$  es número de moléculas de agua.

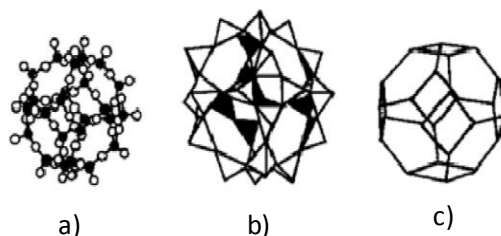
Los elementos metálicos representados por M son cationes de intercambio iónico.

Las zeolitas poseen redes tridimensionales, en que todos los átomos de oxígeno pertenecen simultáneamente a dos tetraedros de  $\text{SiO}_4^{4-}$  y/o  $\text{AlO}_4^{5-}$  que forman redes unidas tridimensionalmente, como se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Unidades estructurales básicas de la zeolita (Curi *et al.*, 2006).

Las redes constituyen una estructura cristalina de las zeolitas parecida a los feldespatos que le proporciona una textura fibrosa con cavidades regulares y uniformes como las que se muestran en la figura 4, ocupadas por moléculas de agua y/o cationes permitiendo el proceso de intercambio iónico (Ambruster & Gunter, 2001).



**Figura 4.** Estructuras típicas de zeolitas a) Atómica, b) tetraédrica, c) cristalina.

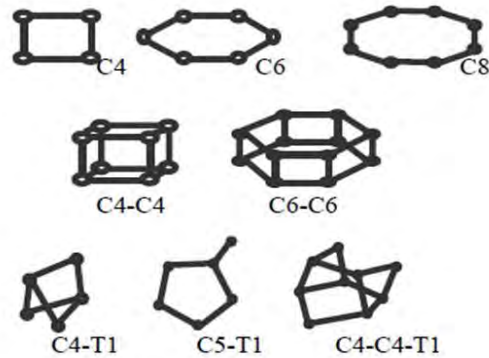
La IUPAC (*The International Union of Pure and Applied Chemistry*) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño: mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si el diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm son microporos; las zeolitas presentan mesoporos y micro poros (Curi *et al.*, 2016).

La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que posee, cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción por lo tanto, para un mismo adsorbato la interacción con las paredes del poro es mayor en cuanto el tamaño del poro es menor y por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida. Las zeolitas contienen iones móviles de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  dentro de su estructura que se pueden intercambiar por otros iones realizándose el equilibrio químico de intercambio iónico (equilibrio 3).

### 2.3.3.1 Clasificación de Zeolitas

Existen más de 80 especies de zeolitas en la Tierra, sin embargo geológicamente no son tan abundantes como otros grupos de silicatos. Se clasifican en ocho grupos de acuerdo con las características comunes de subunidades estructurales que cuentan con un orden específico de tetraedros llamadas unidades secundarias de construcción (SBU) se muestran

en la figura 5; las unidades primarias son tetraedros de  $\text{Si-O}_4^{4-}$  y  $\text{AlO}_4^{5-}$ . La clasificación fue propuesta por Meier en 1968 como se muestra en la tabla 4.



**Figura 5.** Unidades secundarias de construcción (SBU) (Giannetto *et al.*, 1990).

**Tabla 4.** Clasificación estructural de zeolitas según Meier (1968).

<b>Grupo Filipsita C4</b>			<b>Grupo de la Mordenita C8-T1</b>			<b>Grupo de la Faujasita C6-C6</b>		
Zeolita	*TO <sub>4</sub>	*Si/Al	Zeolita	TO <sub>4</sub>	Si/Al	Zeolita	TO <sub>4</sub>	Si/Al
Li-ABW	8		Bikitaita	9		Linde	24	
Filipsita	16		Dischiardita	24		Rho	46	
Harmotoma	16		Epistilbita	24	4-7	ZK5	96	
Gismondita	16		Ferrierita	36		Faujasita	192	
Na-P	16		Modernita	48		Paulingita	672	1-3
Amicita	16		ZSM-5	96	<20	Linde	798	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlionita	32	1-3						
<b>Grupo Analcima C4-C4</b>			<b>Grupo de la Chabasita C6</b>			<b>Grupo de la Heulandita C4-C4</b>		
Analcima	48		Sodalita	12		Brewsterita	16	
Leucita	48	1-3	Cancrinita	12		Heulandita	36	
Wairakita	48		Ofrerita	18		Estilbita	72	2.5-5
A	48		Losod	24		Stellerita	72	
			Gmelinita	24		Barretita	72	
			Liotita	36	2.5-4			
<b>Grupo de la Natrolita</b>			Chabasita	36		<b>Grupo de la Laumontita C8</b>		
Edingtonita	10		Mazzita	36		Laumontita	24	1-2
Gonnardita	20		Erionita	36				
Thomsonita	40	1-2	Aghanita	48				
Natrolita	40		Levynita	54				
Scolecita	40							
Mesolita	120							

\* TO<sub>4</sub> es el número de tetraedros por celda unitaria,

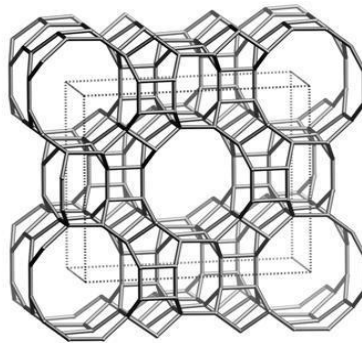
\*Al/Si relación aluminio-silicio en el grupo estructural.

### 2.3.3.2 Mordenita

La mordenita es un mineral de la clase de los tectosilicatos que pertenece al grupo de las zeolitas, su fórmula química es  $[(Na_2CaK_2)Al_2Si_{10}O_{24}]$  (Armbruster & Gunter, 2001).

La mordenita ha sido descrita en cavidades de rocas volcánicas como andesita, basalto, dolerita, porfírita y riolita en rocas intrusivas (granito), como producto diagenético de toba silicificada y en sedimentos volcánicos marinos. En la diagénesis de sedimentos alterados volcánicos, la mordenita se forma en asociación de clinoptilolita, chabasita, erionita, filipsita, ferrierita, analcima, tridimita, cristobalita, ópalo, feldespatos potásicos y esméctica siendo común asociarla a minerales silíceos. Los cationes extra estructurales de la mordenita son Na y Ca generalmente en  $Na > Ca > K$  (Passaglia & Sheppard, 2001).

La estructura de la zeolita es unidireccional, con dos sistemas de poros principales y dos tipos de unidades espaciales de construcción; está constituida por anillos de doce miembros y anillos de ocho miembros que conforman dos sistemas de poros respectivamente como se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Estructura de la Mordenita.

### 2.3.3.3 Génesis de las Zeolitas

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros de rocas por ejemplo en las alteraciones hidro-termales o de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinados en la formación de las diferentes especies de zeolitas.

Existen cerca de 80 especies de zeolitas naturales conocidas sin embargo, solo algunas especies son ampliamente utilizadas en la industria química, farmacéutica, agrícola entre otras como es el caso de la mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, erionita y chabasita (Curi *et al.*, 2016).

#### 2.3.3.3.1 Diagénesis de zeolitas a partir de la alteración de tobas volcánicas

La diagénesis de zeolitas en rocas tobáceas ocurre debido a la alteración de vidrios volcánicos depositados en ambientes acuosos, los cuales se alteran por influencia de factores como pH, salinidad e incremento del agua en los poros de la roca. El proceso de alteración se lleva a cabo cuando la desvitrificación del vidrio presente en la roca, da paso a la formación de tectosilicatos hidratados (zeolitas) que se formaran dependiendo de la composición de la roca.

Las zeolitas aparecen generalmente como un mineral de alteración de los feldespatos que componen a las rocas tobáceas; con el remplazo de las plagioclasas se da lugar a la formación de minerales arcillosos metaestables como la montmorillonita, caolinita o glauconita que se modifican según cambios en el sistema, con este proceso se forma alguna especie del grupo de las zeolitas por ejemplo chabasita, mordenita, clinoptilolita, heulandita etc., (Vázquez, 2016).

#### 2.3.3.4 Yacimientos de las zeolitas naturales

Las zeolitas naturales se encuentran entre los minerales autógenicos, comúnmente en rocas sedimentarias; no obstante debe decirse que se forman en un amplio rango de rocas de diferentes orígenes, edad y ambiente geológico de deposición siendo su presencia en estos medios precisamente lo que ha constituido un criterio directo para su clasificación. A pesar de ello, todavía ciertos aspectos genéticos encuentran un punto de controversia entre los científicos versados en este tema, fundamentalmente en lo relacionado con el ambiente de formación hidrotermal.



Muchos autores están de acuerdo en la existencia de cuatro ambientes o tipos genéticos de yacimientos zeolíticos: diagenéticos, metamórficos, hidrotermales y magmáticos cada uno de ellos con varios subgrupos que los caracterizan como se muestran en la tabla 5 (Costafreda, 2011).

**Tabla 5.** Tipos de yacimientos de zeolitas de acuerdo a su origen (Costafreda, 2011).

<b>Diagenético</b>	<b>Metamórfico</b>	<b>Hidrotermal</b>	<b>Magmático</b>
Suelos	Diagénesis de enterramiento	Coladas volcánicas	Magmática
Sistema hidrológico abierto	Metamorfismo de contacto	Campos geotérmicos	
Sistema hidrológico cerrado.		Hidrotermalismo submarino	
Sedimentos marinos.		Estadios hidrotermales tardíos de rocas plutónicas y pegmatitas.	

Los yacimientos zeolíticos asociados con sistemas hidrológicos abiertos constituyen hoy el tipo más difundido y de mayor importancia industrial.

#### 2.3.3.5 Diversidad Mineralógica de Zeolitas en México

En México en los años setentas fueron descubiertas las primeras manifestaciones de zeolitas (clinoptilolita) en el Estado de Oaxaca, luego fueron encontrados grandes reservas de estos minerales tanto en este mismo estado, como en Sonora, Puebla, San Luis Potosí y en varios otros estados teniendo en cuenta que la mayoría de los yacimientos son del tipo clinoptilolita como se muestra en la tabla 6. Los depósitos de zeolita en Sonora y Oaxaca son los más estudiados y posiblemente de mayor importancia en México (Ostrooumov, 2006).

**Tabla 6.** Distribución de especies de zeolitas en México (Ostrooumov, 2006).

<b>Estados</b>	<b>Especie de Zeolita</b>
Baja California Norte	Analcima, chabasita, escolecita, estilbita, mesolita, natrolita, tomsonita.
Baja California Sur	Heulandita, mesolita, natrolita
Chihuahua	Estilbita, harmótomo, clinoptilolita, mordenita, laumontita, natrolita, tomsonita
Estado de México	Estilbita
Guanajuato	Chabasita, estilbita, clinoptilolita, laumontita, mesolita, mordenita, natrolita.
Guerrero	Heulandita, clinoptilolita.
Hidalgo	Analcima, clinoptilolita, mordenita chabasita, laumontita, natrolita, estilbita.
Jalisco	Analcima, chabasita, escolecita, estilbita, gmelinita, heulandita, clinoptilolita, mesolita, natrolita
Michoacán	Clinoptilolita, mordenita, escolecita, estilbita, mesolita, taumasita, wairakita.
Morelos	Mesolita, natrolita
Oaxaca	Chabasita, clinoptilolita, mordenita, heulandita
Puebla	Clinoptilolita, mordenita
San Luis Potosí	Escolecita, estilbita, clinoptilolita, mordenita, natrolita.
Sonora	Clinoptilolita, heroinita, estilbita, laumontita, mordenita.
Tlaxcala	Clinoptilolita
Veracruz	Clinoptilolita
Zacatecas	Escolecita, estilbita, gismondina, natrolita, taumasita

### 2.3.3.6 Usos de la Zeolita

Se han estudiado diferentes usos de la zeolita: como fertilizante de suelos, prevención de lixiviación de nutrientes, herbicidas, insecticidas y alimento para ganado entre otros usos que a continuación se mencionan.

- A) En la industria del papel; para proporcionarle soporte, mejorar la calidad de impresión, relleno de poros y fibras, brillo, opacidad, retención y blancura.
- B) Descontaminantes de residuos sólidos, líquidos y gaseoso.
- C) Catalizadores y soportes de catalizadores mediante: craqueo catalítico, hidro craqueo, hidroisomerización, transformación del metanol en gasolina,

alquilación, isomerización de aromáticos C8, polimerización, síntesis orgánica y química inorgánica.

- D) Soportes de fertilizantes y acondicionadores de suelos en sistemas de zeopónicos.
- E) Adsorbentes resistentes a ácidos en secado de gases.
- F) Trampas para elementos radioactivos en efluentes líquidos de instalaciones nucleares y como materiales de relleno y cubierta de residuos radioactivos en sus almacenamientos.
- G) Como retenedor-distribuidor del óxido nítrico (NO) en el organismo humano para la estabilización de la tensión arterial, tratamiento de la trombosis (coagulación en los vasos sanguíneos), agente antibiótico, así como para el control de enfermedades renales (Costafreda, 2011).

### 2.3.3.7 Zeolitas en el tratamiento agua

La zeolita de especie clinoptilolita y mordenita sódica han sido estudiadas con éxito en trabajos experimentales para la eliminación de metales pesados en agua a través de adsorción e intercambio iónico, esto debido a los iones intercambiables de su estructura y porosidad. Las zeolitas más utilizadas para tratamiento de agua para consumo humano y residual, son clinoptilolita, chabasita y mordenita debido a su porcentaje de porosidad, de una forma mucho más eficiente y económica que otros materiales como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7.** Zeolitas más usadas en el tratamiento de agua (Ostromoumov, 2006).

<b>Especie Mineral</b>	<b>Sistema Cristalino</b>	<b>Densidad d/sm<sup>3</sup></b>	<b>Relación Si/ Al</b>	<b>Porosidad %</b>	<b>Canales principales Nm</b>
Chabasita	Trigonal	2.1	2	47	0.36-0.37
Clinoptilolita	Monoclinico	2.16	5	39	1
Erionita	Hexagonal	2	3	35	0.36-0.52
Filipsita	Moclínico	2.15	3	34	0.41-0.44
Mordenita	Ortorrombico	2	3	28	0.6-.07

Las zeolitas naturales en sus diversas modificaciones iónicas para los sistemas de filtración y adsorción pueden purificar agua eliminación elementos contaminantes tales como Pb (II), Hg (II), Cr (VI) y Cd (II), entre otros, al mismo tiempo se tienen incrementos en la actividad biológica reduciendo el número de bacterias coliformes y mesofílicas; mejora la eficiencia hidráulica disminuyendo de 1.5-2 veces la caída de la presión, aumenta la utilización de nutrientes y del oxígeno y se mejora la estabilidad de los lodos, gracias a la formación de flóculos alrededor de las partículas zeolíticas, en tanto se aceleran sustancialmente los procesos de degradación biológica y nitrificación.

Las aguas de desecho previamente tratadas se hacen pasar por filtros que contienen una cama de zeolitas y éstas retienen los contaminantes como amonio ( $\text{NH}_4$ ), a través de un proceso de intercambio catiónico, además de retener sólidos suspendidos y de esta manera la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno disminuyen, reduciendo la cantidad de bacterias coliformes. Las zeolitas también reducen considerablemente los olores y sabores desagradables que provoca la polución. Entre las ventajas que ofrecen las zeolitas, se pueden señalar las siguientes:

- a) Son de fácil aplicación y no necesitan condiciones especiales para la construcción de los sistemas de tratamientos de aguas.
- b) No se produce un exceso de compuestos químicos, que posteriormente se conviertan en obstáculo del tratamiento y el exceso de lodos puede ser fácilmente removido para su uso en la agricultura por ejemplo.
- c) Los cationes de calcio y magnesio que causan dureza en el agua, son removidos por las estructuras de las zeolitas, mediante un proceso de intercambio iónico por iones de sodio.

Las zeolitas se colocan en los filtros o columnas y pueden ser efectivas en este tipo de tratamiento, siguiendo los equilibrios químicos 3 y 4 (Arboleda, 1972).

## CAPÍTULO 3

# MARCO GEOLÓGICO

### 3.1 Fisiografía

La cantera “Real del Monte” del barrio de Tezoantla, Mineral del Monte pertenece a la provincia fisiográfica del Eje volcánico del sistema montañoso de la Sierra de Pachuca; las prominencias que destacan son: los cerros de El Hiloche y El Judío, Peña del Águila, Peña Zumate y Peñas Cargadas (INEGI, 2009).

### 3.2 Clima

Debido a la altitud del municipio en la población predomina el clima frío clasificado como Templado subhúmedo C (E) (W2), con un rango de temperatura de 10 °C a 14 °C y un rango de precipitación anual de 500 a 1100 mm, presentando lluvias en invierno (INEGI, 1995).

### 3.3 Hidrografía

Este municipio se encuentra posicionado en la región hidrológica del Pánuco, en las cuencas del río Moctezuma dentro de las subcuencas del río Amajac, río Tezontepec y río Metzquititlán los cuales forman un caudal que desemboca en el río Moctezuma Tamazunchale, San Luis Potosí, (INEGI, 2009).

### 3.4 Suelos

Su tipo de suelos son principalmente Luvisol, Regosol y Phaeozem, su uso principalmente es para la agricultura y un 9.15 % está destinado a la zona urbana. Su vegetación es de bosque y pastizal con una flora exuberante y fértil debido a la altitud de la región, se encuentra una gran variedad de coníferas destacando el avellano, encino, ocote, oyamel, ciprés y el pino además de vegetales alimenticios como maíz, frijol y algunas variedades de árboles frutales como manzanos, ciruelos etc., (INEGI, 1995).

### 3.5 Geología Regional

En Mineral del Monte Hidalgo se presenta un marco geológico definido por rocas volcánicas, que son características de la Faja Volcánica Transmexicana, provincia que ocupa la mayor parte del territorio del estado de Hidalgo cuya actividad dio como resultado la secuencia de rocas extrusivas, de tipo piroclástico que conforman al Grupo Pachuca en donde se encuentran rocas ígneas andesíticas, riolíticas y basálticas, derivadas de una gran actividad volcánica cenozoica en forma de derrames, depósitos de flujo y caída libre. Se considera que dicha actividad volcánica va del Oligoceno temprano hasta el Mioceno y continua hacia el Plioceno (Demant, 1975).

La faja Volcánica Transmexicana ha sido dividida en tres sectores con base a su geología tectónica y composición:

Porción occidental: se encuentra entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los *rifts* de Zacoalco, Chapala y Colima con vulcanismo de composición basáltico-andesítico.

Porción central: comprendida entre el *rift* de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro, donde se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes tipo escudo de composición basáltica o basáltico-andesítica.

Porción Oriental: entre el oriente del sistema Taxco-Querétaro y Palma Sola en la costa del Golfo de México con una composición andesítica a riolítica (Ferrari, 2000).

Las rocas características de la Faja se encuentran en la porción oriental de la Sierra de Pachuca, la cual es una cordillera situada en el sur-oriente del estado de Hidalgo, formada de rocas terciarias en las que predominan tres litologías: andesita, riolita y basalto con sus respectivas variaciones y las cuales se distribuyen en toda la región montañosa y que en conjunto constituyen al denominado Grupo Pachuca.

### 3.5.1 Grupo Pachuca

Esta unidad fue propuesta por Segerstrom (1962), para un grupo de rocas volcánicas, muy falladas, intrusionadas, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas que subyacen a flujos riolíticos y sobreyacen a las rocas del Grupo el Morro en la Sierra de Pachuca. Posteriormente Geyne *et al.* (1963) mencionan que dentro de este grupo se encuentran incluidas ocho formaciones: Formación Santiago o conocida también como Riolita Santiago, Formación Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo, San Cristóbal y Tezoantla (Segerstrom, 1962).

El grupo Pachuca se encuentra en discordancia angular sobre las rocas sedimentarias del Cretácico, la litología corresponde a paquetes gruesos de depósitos volcánicos producto de la actividad de un importante complejo que forma la Sierra de Pachuca la cual se caracteriza por estar intensamente mineralizado; está constituido por diez formaciones que se describen a continuación de base a cima.

*Formación Santiago:* Esta unidad fue inicialmente nombrada en mapas e informes privados de la compañía Real del Monte y Pachuca como Andesita Fortuna por Hulin; Geyne *et al.*, (1963) indica que el nombre de Fortuna ha sido establecida para nombrar otras rocas en informes publicados referentes a la geología del continente norteamericano y le da formalidad al término Santiago para las rocas terciarias más antiguas dentro de los límites del distrito de Pachuca-Real del Monte. Su localidad tipo se ubica en las cercanías del Cerro Santiago o de Coronas al oriente del centro comercial principal de Pachuca; corresponde al Oligoceno temprano que consiste en derrames de lava, brechas y tobas interestratificadas de composición variable de andesítica a riolítica, con algunas intercalaciones de rocas volcánicas epiclásticas (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Corteza:* esta unidad fue inicialmente denominada como Andesita Negra y fue incluida en serie fortuna de Hulin. Posteriormente Geyne *et al.*, (1963) proponen el término Formación Corteza en alusión a la veta Corteza de la mina San Juan Pachuca. Su localidad tipo corresponde al tramo del cruceo Fortuna ubicado entre la veta Corteza y la base de la capa tobácea basal de edad oligocénica media, compuesta por partículas de

tamaño del limo y bien litificada, derrames andesíticos y basálticos con un miembro tobáceo basal. Contiene una cantidad considerable de pigeonita, junto con microlitos de andesina y labrodorita, con oligoclasa en algunos derrames (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Pachuca:* Geyne *et al.*, (1963) le dan formalidad a la propuesta Formación Pachuca incluyéndola dentro de lo que proponen como Grupo Pachuca. Su localidad tipo corresponde al afloramiento ubicado en la orilla oriental de Pachuca, corresponde al Oligoceno tardío y probablemente a los inicios del Mioceno. Las rocas que constituyen la formación son las siguientes: un miembro clástico tobáceo bastante continuo en la base, cubierto por derrames andesíticos y dacíticos interestratificados con varios miembros tobáceos lenticulares y hasta con diez capas alternadas con derrames relativamente masivos en la parte superior de esta formación (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Real del Monte:* La designación fue propuesta por Geyne *et al.*, (1963) Consiste en brechas interestratificadas con derrames, derrames masivos y tobas de composición andesítica y dacítica. Ubicada en la parte baja del Mioceno temprano a medio. Su localidad tipo se ubica en el poblado de Real del Monte (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Santa Gertrudis:* Su nombre fue propuesto por Geyne *et al.*, (1963) para designar una sucesión de derrames de brecha, aglomerados, rocas volcánicas epiclásticas de composición dacítica correspondientes al Mioceno medio. Su localidad tipo se encuentra en la población de Real del Monte, en la veta Santa Gertrudis de las minas La Rica y La Purísima, con espesor de 350m (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Vizcaína:* Su nombre fue propuesto por Geyne *et al.*, (1963), adoptada de la correspondiente una veta-falla (Vizcaína). Fue extravasada durante el Mioceno tardío. Comprende derrames de lava, capas de brecha y toba, un miembro clástico basal. Todas estas rocas son principalmente andesitas y dacitas. Su localidad típica se encuentra en el poblado de Real del Monte en veta-falla mencionada, su espesor varía de 200 a 400 m (Geyne *et al.*, 1963).



*Formación Cerezo:* La definió Geyne (1963) de edad Mioceno tardío a Plioceno Temprano y consta principalmente de derrames y capas volcánicas epiclásticas con brecha volcánica y brecha tobácea, de composición variable de riolítica a riodacítica (Geyne 1963).

*Formación Tezoantla:* inicialmente, los geólogos de la Compañía Real del Monte y Pachuca usaron el nombre de “Serie El Águila” para referirse a esta unidad; posteriormente Segerstrom (1962) reconoce estos depósitos como formación Tezoantla. La propuesta formal de la Formación Tezoantla fue realizada por Geyne *et al.*, (1963). Su localidad tipo se encuentra al sur del poblado de Tezoantla; consiste de tobas riolíticas con un conglomerado basal constituido por fragmentos andesíticos y derrames de lavas dacíticas y riolíticas, de edad Pliocénica Temprana (Geyne *et al.*, 1963).

*Formación Zumate:* Segerstrom (1962) propone el término Zumate para las rocas aflorantes dentro del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte. Posteriormente Geyne *et al.*, (1963) dan formalidad a esta unidad. Su localidad tipo se encuentra en el Cerro del mismo nombre a 3 Km al norte de Real del Monte, de edad Pliocénica tardía corresponde a dacitas relativamente inalteradas, poco falladas y sin mineralización cuarcífera, pero afectadas por diques, es una sucesión de derrames, derrames de brecha, aglomerados y rocas volcánicas epiclásticas de composición dacítica (Segerstrom, 1962).

*Formación San Cristóbal:* El nombre de esta formación fue propuesta por Geyne (1963), para un paquete de rocas intermedias y máficas compuestas por derrames de andesitas y basaltos de olivino, su espesor es de aproximadamente 300 m, aflora en la región de Pachuca y Real del Monte. Está formada por derrames densos de andesitas olivínicas, con cantidades pequeñas de capas tobáceas y clásticas. Fue extravasada a fines del Plioceno (Geyne, 1963).

En la figura 7 se observa la estratigrafía del Grupo Pachuca compuesta por diez formaciones en dos paquetes de base a cima.

Edad	Espesor (m)		Formación
<b>Plioceno</b>	0-500+	Paquete 2	Fm. San Cristobal
	0-300		Fm. Zumate
	0-500+		Fm. Tezuantla
	0-200		Fm. Cerezo
<b>Mioceno</b>	0-600	Paquete 1	Fm. Vizcaína
	0-350		Fm. Santa Gertrudis
	0-350		Fm. Real del Monte
	110-620		Fm. Pachuca
<b>Oligoceno</b>	50-300	Paquete 1	Fm. Corteza
	>480		Fm. Santiago

**Figura 7.** Formaciones Geológicas que componen al Grupo Pachuca (Geyne *et al.*, 1963).

### 3.5.2 Geología Local

La región de Tezoantla se localiza en la porción oriental del estado de Hidalgo, en donde han sido reportadas secuencias piroclásticas del Plioceno Temprano (4.9-4.5 Ma) que se encuentran intercaladas y cubiertas por lavas basálticas que constituyen un arreglo petrológico bimodal (Gómez *et al.*, 2005).

La geología de la cantera de Tezoantla corresponde a las Formaciones Cerezo y Tezoantla la cual sobreyace a la Formación Vizcaína. Estas dos unidades presentan afinidad litológica y se diferencian únicamente porque la Formación Cerezo presenta alteración hidrotermal, lo que se evidencia por la presencia de manganeso en forma de dendritas de pirolusita (Geyne, 1963; Segerstrom, 1962).

El depósito de cantera, está constituido por roca volcánica de composición intermedia por su contenido en sílice (52 a 65%), de color blanco y en partes tenuemente verdosas, formada por piroclastos empaquetados de una manera particular y dispuesta a manera de pseudoestratos afectados posteriormente por la intrusión de un pórfido riolítico que corona a la secuencia que da como resultado dos sistemas preferenciales de fallas y fracturas estructuradas a manera de abanico y que conforman su estructura de domo actual (Vázquez, 2016).

La roca que se usa para fines de interés económico se encuentra integrada en la Formación Cerezo que está constituida por tobas ácidas formadas a partir de al menos cuatro eventos explosivos de tipo pliniano, que dio lugar a cenizas, pómez y lapilli que fueron depositadas posteriormente como material de caída dentro de un cuerpo de agua, lo que ocasionó que los feldespatos se transformaran a minerales zeolíticos de interés industrial. Esta roca se caracteriza por su aspecto terroso de grano fino y una textura laminar de color opaco lechoso. En una muestra de mano se puede identificar cuarzo subhedral y fenocristales de feldespatos con una pequeña cantidad de minerales ferro-magnesianos y óxidos de color verde oscuro (Vázquez, 2016).

### 3.5.3 Deposición de desechos de cantera

Los residuos de cantera de Tezoantla se han acumulado en el banco de extracción y en la zona del bosque que lo rodea han causado la erosión de suelo y la destrucción del paisaje natural (figura 8); por otra parte esto representa un problema económico, porque no se aprovecha el material explotado en su totalidad (Sierra, 2014).



**Figura 8.** Depósito de desechos de cantera y contaminación visual del paisaje.

En la cantera de Tezoantla se explota a cielo abierto sin una planificación que pone en riesgo a los trabajadores y el uso de dinamita para la extracción de bloques, ha generado un alto porcentaje de polvos y desechos que se han acumulado en el bosque que rodea el banco de cantera, ocasionando una contaminación visual del paisaje (Islas, 2007).

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA

### 4.1 Localización geográfica y vías de acceso a la zona de estudio

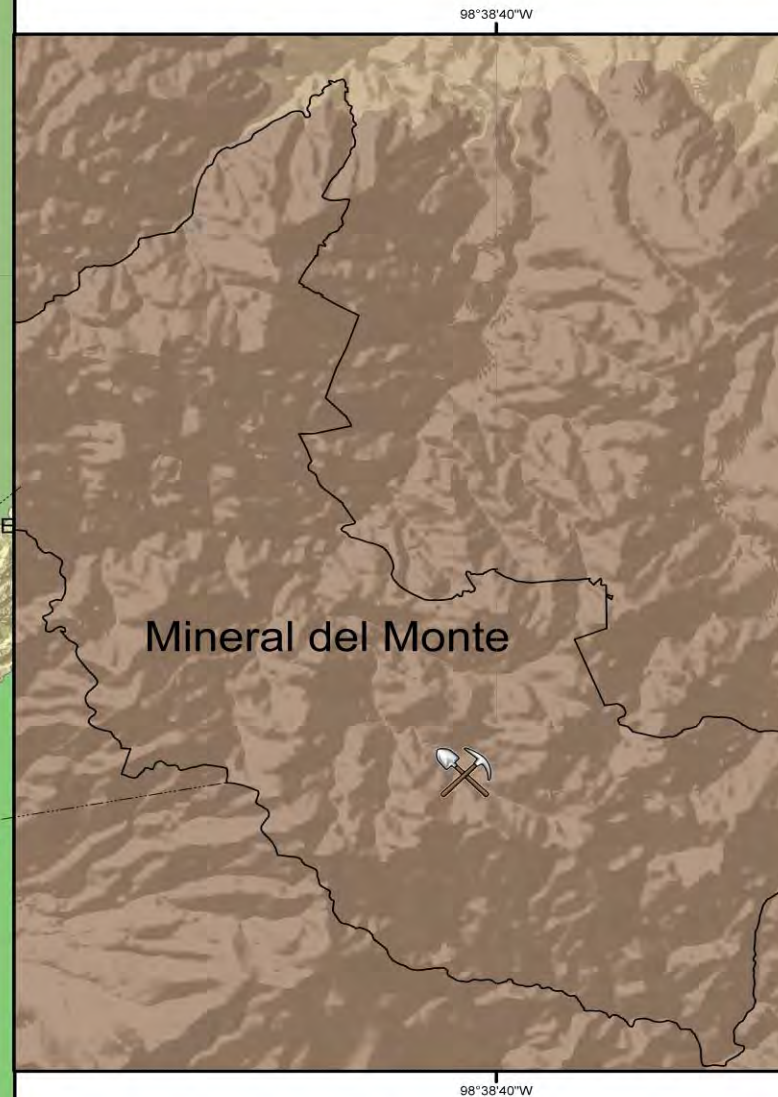
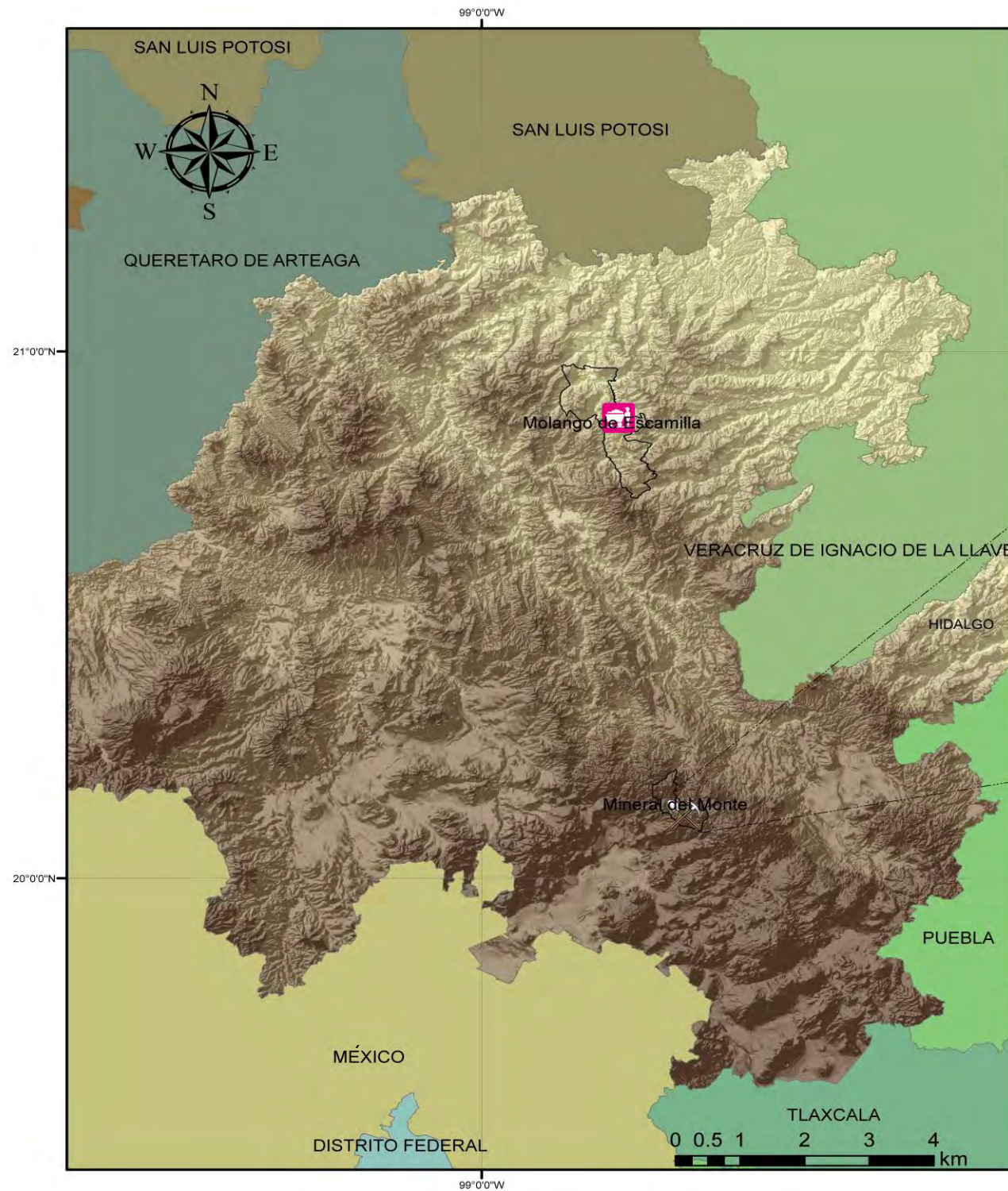
La población de Tezoantla se encuentra ubicada en el municipio de Mineral del Monte Hidalgo, en las coordenadas geográficas 20° 06' 59.49526" Norte, 98° 38' 21.94338" Oeste , cubriendo una superficie aproximada de 30 km<sup>2</sup> con una altura de 2914 msnm. El acceso al sitio es por la carretera federal No 105 en dirección México-Tampico hasta llegar a la Población de Real del Monte, posteriormente se toma un camino que lleva a la carretera estatal No.115 y que comunica al poblado de Tezoantla donde se encuentra el banco de cantera “Real del Monte”.

La caliza manganesífera se obtuvo del Tajo Naopa localizado en el municipio de Molango en el estado de Hidalgo (México) entre las coordenadas 20° 52' 24.99960" Norte y 98° 45' 42.99840" Oeste.

En la figura 9 se puede observar la localización de la zona de estudio que es la Cantera de Tezoantla y el Tajo Naopa en el estado de Hidalgo.



## UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE TEZOANTLA HGO.



Autor: Karen Yazmin Meneses Salas  
 Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: grados

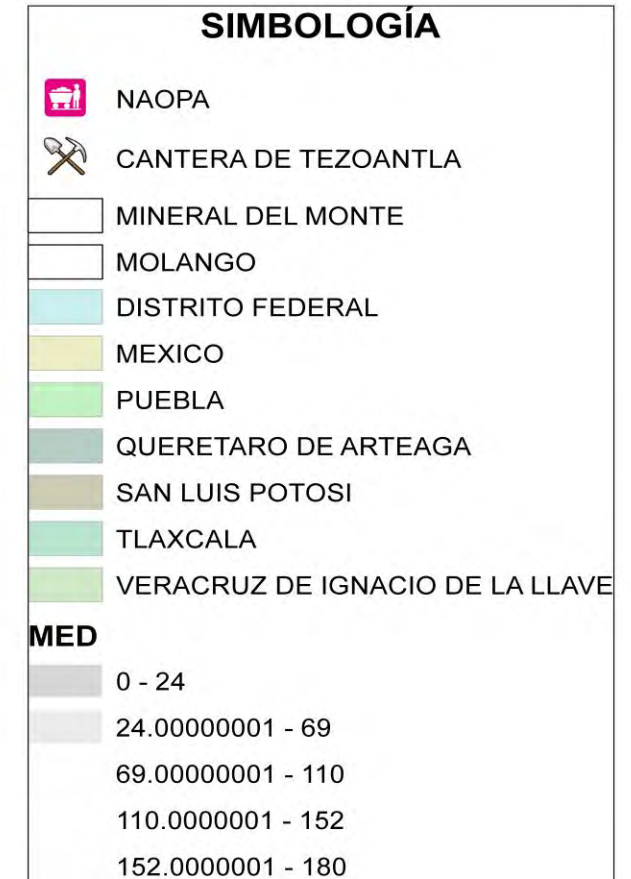


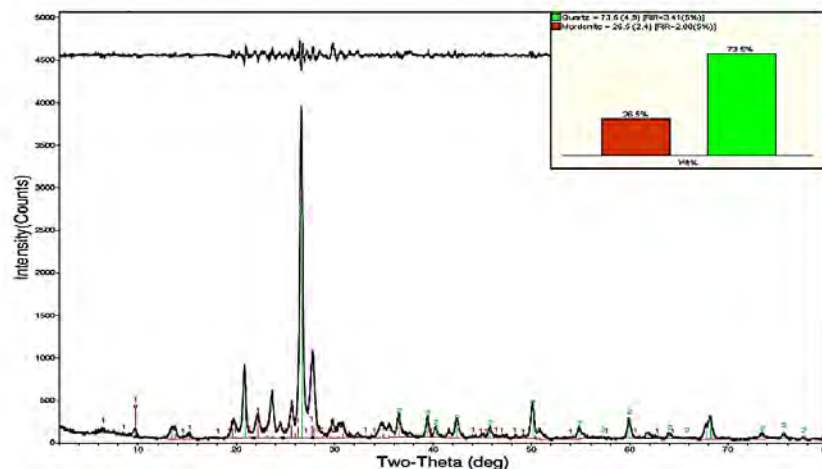
Figura 9. Ubicación Geográfica de la Cantera de Tezoantla en el estado de Hidalgo.



## 4.2 Selección de las muestras de tobas para la evaluación de adsorción

Las muestras de toba dacítica fueron caracterizadas previamente en el trabajo tesis de licenciatura “Cartografía geológica de la sucesión de eventos volcánicos en la cantera de Tezoantla, municipio de Mineral de Monte Hidalgo (México)” de Vázquez (2016) y por Sierra (2014) en el trabajo de tesis de maestría “Estudio de materiales geológicos para ser utilizados como adsorbentes de Pb y Cr en soluciones acuosas”. En base a estos trabajos las muestras se seleccionaron por su composición de feldespatos, ya que Sierra (2014) describe que la mordenita sódica procede de la alteración de feldespatos sódicos y que además, la toba debe presentar características como una granulometría muy fina y color blanco, en la cual se pueden observar algunos microcristales en una muestra de mano (Vázquez, 2016; Sierra, 2014).

En análisis de difracción de rayos X se encontraron las especies minerales principales de las rocas dacíticas de Tezoantla: cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y mordenita  $[(\text{Na}_2\text{CaK}_2)\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24}]$  que se identifican en la siguiente figura 10 (Sierra, 2014).



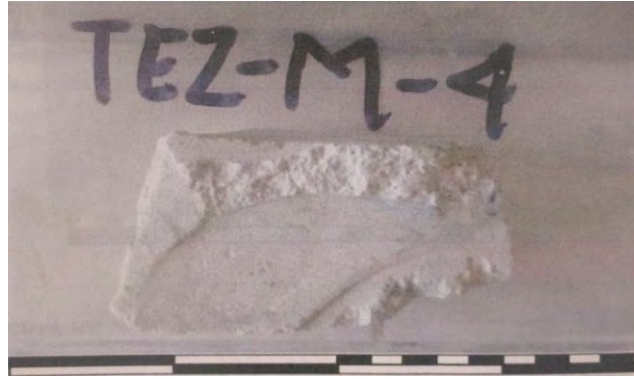
**Figura 10.** Difractograma de rayos x de la muestra de Tezoantla (Sierra 2014).

En base a la clasificación de rocas en el perfil de la cantera de Tezoantla Hgo., de Vázquez (2016), para este estudio se utilizaron las muestras TEZ-M-4 y TEZ-M-9. La descripción del perfil se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8.** Perfil de la cantera de Tezoantla Hgo (Vázquez, 2016).

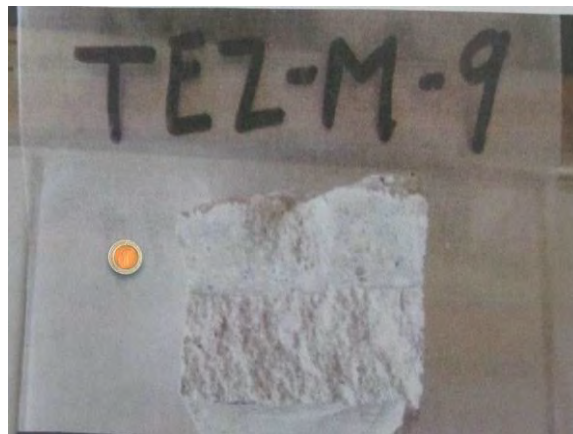
Perfil		Evento volcánico
Toba pumítica con escasas laminaciones	TEZ-M-13	EVENTO 4
Toba pumítica fluidal convoluta	TEZ-M-12	
Toba pumítica de ceniza fina con laminación suave	TEZ-M-11	
Toba pumítica de ceniza fina a muy fina	TEZ-M-10	
Lapilli tobácea pumítica	TEZ-M-9	
Lapilli tobácea pumítica	TEZ-M-8	
Toba pumítica de ceniza fina a muy fina laminar	TEZ-M-7	EVENTO 3
Toba pumítica masiva	TEZ-M-6	
Toba de lapilli arenosa bandeada pumítica	TEZ-M-5	
Toba pumítica masiva	TEZ-M-4	EVENTO 2
Lapillita pumítico-lítica masiva	TEZ-M-3	
Toba lapillita masiva pumítica	TEZ-M-2	EVENTO 1
Lapillita tobácea laminar pumítica	TEZ-M-1	

La muestra de mano etiquetada como TEZ-M4 que se muestra en la figura 11 corresponde a una toba pumítica masiva con fragmentos de pómez del tamaño de lapilli, en la que la pómez es más abundante que los cristales de cuarzo y feldespatos y estos a su vez se encuentran más abundantes que los fragmentos de roca.



**Figura 11.** Muestra de toba TEZ-M4.

La muestra TEZ-M9 que se muestra en la figura 12 corresponde a una lapillita tobácea pumítica compuesta por abundantes fragmentos de pómez, los cuales son seguidos en abundancia por cristales de cuarzo y feldespato, y estos a su vez se presentan en mayor cantidad que los fragmentos de roca.



**Figura 12.** Muestra TEZ-M-9.

#### 4.3 Caracterización de caliza manganesífera del Tajo Naopa

El manto manganesífero del tajo Naopa en Molango de Escamilla Hgo., ha sido caracterizado en el trabajo de tesis de licenciatura “Estudio geoquímico-mineralógico del yacimiento manganesífero del tajo Naopa, Distrito Minero de Molango, Hidalgo (México)” de Santander (2015). La mineralogía de mena se presenta principalmente en forma carbonatada y las especies minerales están representadas por: manganocalcita (8 -15 %



Mn), rodocrosita (25-29 % Mn) y en menor proporción pirolusita como fase oxidada (<50 % Mn) incluida en la porosidad primaria de las rocas calizas. Otras especies minoritarias coexistentes son: calcita piritita, rodonita, cuarzo y piritita. Debido al porcentaje de  $Mn^{2+}$  contenido en la roca, se colectó una muestra de caliza manganesífera del manto descrito para realizar la solución acuosa de caliza manganesífera de este estudio.

### **4.3 Preparación de solución acuosa de caliza manganesífera**

Para obtener una solución con alto contenido de Mn se disolvió una caliza manganesífera proveniente del tajo Naopa Hgo., colocando una fracción de caliza con un peso de 464.7 g en una en un recipiente de 2 L con solución ácida al 10 %, la cual se dejó en reposo por 2 semanas con el recipiente cerrado para evitar el contacto con contaminantes atmosféricos. La solución cambió de ser transparente a un tono naranja debido a que el ácido atacó principalmente a las caras expuestas de la roca que contenían piritita formándose una especie de gel rojizo. La solución presentó un pH de 1.51 y una concentración de Mn de 246.92 mg/l.

Una segunda solución acuosa se obtuvo a partir de la primera pero con un tratamiento de precipitación; la primera solución con concentración de 246.9 mg/l se colocó en una tina donde inicialmente se agregaron 5ml de NaOH ajustando el pH de neutro a alcalino hasta precipitar. Una vez que la solución fue precipitada esta se colocó en embudos con papel filtro para separar la fase precipitada de la solución, hasta obtener un líquido transparente.

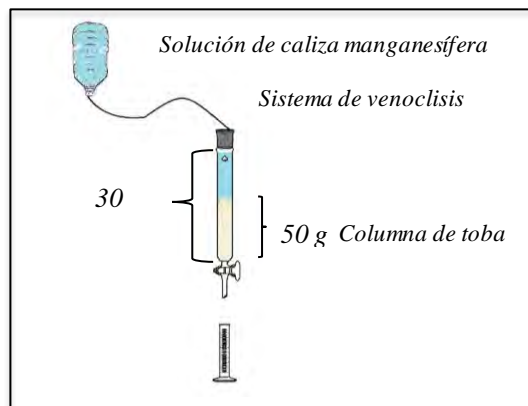
### **4.4 Diseño de la columna de adsorción**

Para la columna de adsorción se utilizó toba dacítica procedente de la cantera de Tezoantla Hgo., la cual se trituró y tamizó en dos granulometrías: malla 10 (1.68-2.0 mm) y malla 14 (1.41-1.68 mm); se colocó un set de tamices en el orden de tamaño de malla del 10, 12, 14, 16 y 100 para ponerlas en agitación por 10 min en un Ro-Tap para homogeneizar las partículas y posteriormente montar dos columnas de adsorción.

Para las pruebas de adsorción preliminares la toba de malla 10, está se lavó y enjuagó tres veces para eliminar las partículas que obstruyeran los poros, sin embargo no se le adicione ningún intercambiador iónico.

Para las pruebas de adsorción con toba malla 14 esta se lavó con agua para eliminar las partículas finas repitiendo el lavado tres veces, se le adicionó una solución de NaCl al 4 % y utilizando un agitador horizontal se mantuvo en agitación constante durante 6 h, se quitó y se enjuagó con agua destilada hasta que el agua fuera transparente, para confirmar la activación se agregó una solución de  $\text{AgNO}_3$  la cual no precipito lo cual indico una correcta activación.

La toba dacítica de ambas granulometrías se montaron en columnas de adsorción con 50 g de toba, en una columna de vidrio de 30 cm de altura y 2.0 cm de diámetro, las cuales se conectaron a la solución de caliza manganesífera a la columna por un sistema de venoclisis como se muestra en la figura 13.



**Figura 13.** Sistema de adsorción de Mn en columna.

Para las pruebas preliminares se utilizó solución de caliza manganesífera con una concentración de 246.92 mg/l, la cual se pasó por la columna con toba de malla 10 a, la velocidad del flujo fue de 60 ml/h es decir 1 ml/min, para permitir el intercambio iónico. El volumen ocupado por la toba zeolítica fue de 65 ml, en consecuencia 1Bed Volume (BV) = 65 ml; los primeros 2 BV de agua que se colectaron se desecharon y los siguientes 2BV se

reservaron en una alícuota de 25 ml para su posterior análisis y el resto se desechó; esta secuencia se repitió consecutivamente hasta obtener un total de 12 fracciones.

Posteriormente las fracciones colectadas de la columna de toba malla 10 fueron precipitadas con NaOH ajustando el pH de neutro a alcalino para eliminar por precipitación los elementos presentes en la solución de caliza manganesífera y reducir los niveles de Mn.

Para la columna con toba de malla 14, el procedimiento de adsorción se realizó igual que para la anterior columna, sin embargo la concentración  $Mn^{2+}$  en la solución de caliza manganesífera fue de 174.46 mg/l.

#### **4.5 Técnica espectrometría de absorción atómica**

Para el análisis exclusivo de  $Mn^{2+}$  en las muestras colectadas de las columnas de adsorción se ocupó un espectrómetro marca Varian modelo SpectrAA 880 equipado con un dilutor automático y con un software Spectra 880 para fijar las condiciones de trabajo tales como corriente de la lámpara, longitud de onda del haz de energía, flujo de acetileno y aire, concentración de los estándares del elemento a analizar.

Se preparó una curva de calibración del elemento Mn, con un estándar certificado y de concentración conocida (1000 ppm) de la marca Perkin Elmer Pure. La concentración de la muestra se obtiene directamente del equipo o a partir de las ecuaciones 8 y/o 9 que se presentaron anteriormente.

#### **4.6 Análisis de muestras (ICP-AES)**

Para realizar el análisis del contenido elementos presentes en la solución de caliza manganesífera y en las muestras colectadas de la columna de adsorción, se utilizó un espectrofotómetro de emisión de plasma por acoplamiento inductivo de la marca Perkin Elmer Modelo Optima 8300 como se muestra en la figura 14, que contiene un generador de cuarta generación de 40 Mhz, ajustable de 750 a 1500 W, con un flujo de Ar de 5 l/min; utiliza una bomba peristáltica para la introducción de la muestra a un flujo de 1.0 ml/min y

utiliza un detector de arreglo de carga segmentado con 235 sub arreglos direccionados para proporcionar la detección de 6000 longitudes de onda simultaneas y su rango de trabajo va de 163 a 782 nm.



**Figura 14.** Equipo Perkin Elmer Óptima 8300.

Para realizar el análisis se prepararon curvas de calibración de los elementos Al, Fe, Si, Ca, Na, Mg, K, Ti, Mn, P y S con un estándar multielemental certificado de la marca Perkin Elmer Pure.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Pruebas preliminares de la adsorción

Para la columna de adsorción de toba sin activar, malla 10, se utilizó una solución acuosa de caliza manganesífera de 246.92 mg/l de  $Mn^{2+}$ , en base a este dato inicial se calculó el porcentaje de  $Mn^{2+}$  adsorbido a partir de las muestras colectadas que se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9.** Concentración y porcentaje de adsorción de  $Mn^{2+}$  en toba dacítica malla 10.

Fracción	Tiempo horas	Volumen ml	$Mn^{2+}$ mg/l	% de adsorción
0	-	-	246.9	-
1	4	240	248.0	0
2	8	480	247.9	0
3	12	720	247.9	0
4	16	960	247.9	0
5	20	1200	247.9	0
6	24	1440	246.8	0
7	28	1680	246.8	0
8	32	1920	245.7	0.5
9	36	2160	245.7	0.5
10	40	2400	245.7	0.5
11	44	2640	245.7	0.5
12	48	2880	246.8	0.0

Se observa que el porcentaje de adsorción para  $Mn^{2+}$  es nulo, esto se puede atribuir a la presencia y competencia de los iones presentes en la solución que no permitieron la adsorción del  $Mn^{2+}$ . Generalmente cuando se realiza la evaluación de adsorción en zeolitas de cualquier especie con soluciones sintéticas o naturales que contienen más de un ion ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Mg^{2+}$ ), la eficiencia de remoción disminuye por la competencia que hay entre ellos en el intercambio iónico, causando saturación del medio adsorbente y la disminución en adsorción para el ion que se desea eliminar (Cuchimaque *et al.*, 2013).

### Comparación entre los resultados obtenidos de la columna malla 10 y los precipitados

Los resultados obtenidos de las muestras colectadas de la columna de malla 10, en comparación a las mismas que fueron precipitadas se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10.** Comparación de pH inicial y final y concentración de  $Mn^{2+}$  en mg/l.

Fracción	*pH <sub>i</sub>	*C <sub>i</sub>	*pH <sub>f</sub>	*C <sub>f</sub>
1	3.5	246.92	7.59	66.88
2	3.37	248.03	7.27	72.99
3	3.85	247.90	7.92	78.71
4	3.99	247.90	7.25	66.81
5	5.2	247.90	7.61	71.61
6	4.95	247.90	7.19	70.06
7	5.17	246.82	7.4	74.20
8	5.19	246.82	7.27	75.96
9	5.27	245.73	7.26	73.51
10	5.27	245.73	7.35	79.56
11	5.24	245.73	7.26	67.81
12	5.23	246.82	7.38	139.22
Des. Est		0.92		19.71
Promedio		247.02		78.11

\*pH<sub>i</sub> es pH inicial

\*pH<sub>f</sub> es pH final

\*C<sub>i</sub> es concentración inicial

\*C<sub>f</sub> es concentración final

Se observa la influencia que ejerce el pH, ya que en la solución acuosa de caliza manganesífera ácida tiende a incrementarse la concentración de  $Mn^{2+}$ ; en cambio, después de la precipitación a pH neutro a alcalino, la concentración de  $Mn^{2+}$  disminuye considerablemente.

### Elementos mayores presentes en la solución acuosa de caliza manganesífera

La lectura de las concentraciones de elementos mayoritarios presentes en la solución de caliza manganesífera se leyeron después de ser precipitada y filtrada debido a los nulos resultados en las pruebas preliminares de adsorción con toba de malla 10, por lo que fue de suma importancia conocer con que elementos competía el  $Mn^{2+}$  en la capacidad de adsorción. En los resultados de la tabla 11 se muestra la presencia de otros iones que probablemente causaron la baja capacidad adsorción de  $Mn^{2+}$  en la columna de toba.

**Tabla 11.** Elementos mayores de la solución de caliza manganesífera en mg/l.

Elemento	mg/l.
Al	0.23
Fe	*ND
Si	0.64
Ca	38.92
Na	13.65
Mg	30.49
K	1.84
Ti	*ND
Mn	174.16
P	ND
S	1.03

\*ND No Detectado

Se observa que la concentración de los elementos Al, Fe, Si, Ti y P no se detectó debido a que posiblemente hayan precipitado en la solución y los elementos con concentraciones altas son Ca, Mg, Na y  $Mn^{2+}$ , sin embargo sus concentraciones deben ser menores a las concentraciones iniciales, debido a que co-precipitaron con los iones anteriores y debido a que sus constantes de precipitación son bajas (Ringbom, 1979). (Cuchimaque, *et al.*, 2013).

### Pruebas de adsorción con toba dacítica malla 14

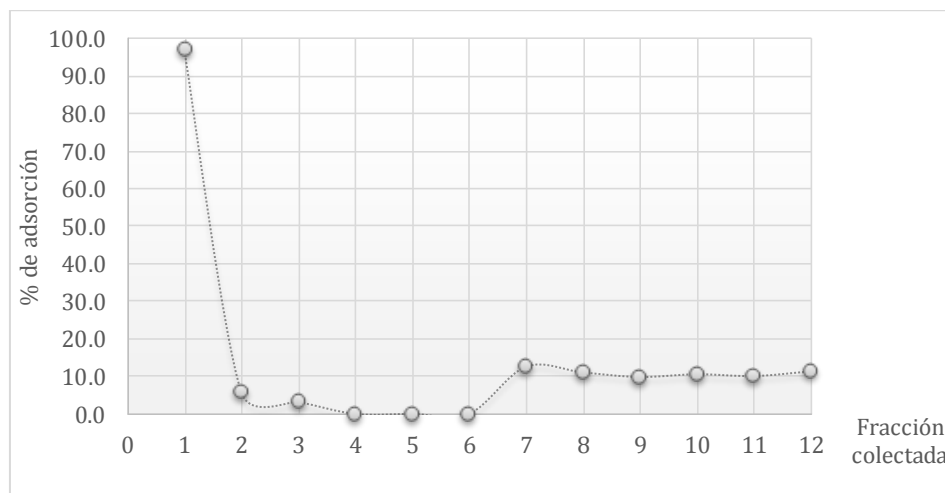
La segunda columna que se probó fue con toba activada, triturada a malla 14 y se evaluó con una solución de caliza manganesífera con concentración de  $Mn^{2+}$  de 174.2 mg/l. En la tabla 12 se muestran las concentraciones según la fracción colectada así como el porcentaje de adsorción.

**Tabla 12.** Porcentaje de adsorción y concentración en mg/l.

Fracción	Tiempo Horas	Volumen ml	$Mn^{2+}$ mg/l	% de adsorción
0	-	-	174.2	-
1	4	240	5.4	97
2	8	480	164.2	5.7
3	12	720	168.6	3.2
4	16	960	176.3	0
5	20	1200	181.6	0
6	24	1440	176.5	0
7	28	1680	152.3	12.6
8	32	1920	154.9	11
9	36	2160	157	9.8
10	40	2400	155.8	10.6
11	44	2640	156.6	10.1
12	48	2880	154.4	11.3

En la Gráfica 1 se muestra el porcentaje de adsorción en relación a las fracciones colectadas.

**Gráfica 1.** Porcentaje de adsorción en Toba Dacítica # 14.





Se puede observar que solo hubo retención de  $Mn^{2+}$  del 96.9% en las primeras 4 horas lo cual es un buen porcentaje de adsorción, para las siguientes 8 horas la retención fue mínima y después de las 16 horas la retención fue nula, por lo que la saturación del medio poroso fue en poco tiempo y para una cantidad muy pequeña (480ml).

A partir de los datos de la tabla 12 se determinó la capacidad de intercambio iónico ( $C_{int}$ ) de  $Mn^{2+}$  en la toba dacítica, considerando los siguientes datos: para la ecuación 1: volumen de solución retenido de mena ( $V_{sr}$ ) fue de 480 ml de concentración inicial de  $Mn^{2+}$  ( $C_i$ ) de 174.2 mg/l, el peso de toba utilizada fue de 50 g y el peso atómico de  $Mn^{2+}$  es de 54.93 g/mol.

$$C_{int} = \frac{V_{sr} \times C_i}{P_{muestra}} * \frac{2 \text{ meq Mn}}{PA_{Mn}} = \frac{0.480 \text{ l} * 174.2 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{50000 \text{ mg}} * \left( \frac{1 \text{ meq}}{27.465 \text{ mg}} \right) * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.06 \text{ meq/g}$$

Esto nos indica que la capacidad de intercambio de toba dacítica es muy baja, ya diferentes autores recomiendan que una buena capacidad de retención deba ser de 1 a 2 meq/g (Leyva *et al.*, 2005).

Se justifica que la capacidad sea baja para este elemento debido a que en la solución ocupada a partir de la disolución de caliza manganésífera están presentes otros iones como  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Fe^{3+}$ , entre otros, que compiten en la adsorción en la toba.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

La evaluación de adsorción en toba dacítica de malla 10 para  $Mn^{2+}$  en solución de caliza manganesífera, no presentó retención debido que la solución contenía iones de Al, Fe, Si y Ca, los cuales fueron interferentes y compitieron con  $Mn^{2+}$  en el proceso de adsorción.

Para que el proceso de adsorción resultará eficiente se realizó un tratamiento primario de precipitación química y una posterior filtración a la solución de caliza manganesífera, con lo cual se redujeron los niveles de los elementos interferentes que compiten con  $Mn^{2+}$  en el proceso de adsorción, así mismo se redujo la concentración de  $Mn^{2+}$ . Este proceso es importante ya que al disminuir las concentraciones de los elementos presentes en la solución acuosa, la adsorción fue mayor en la toba dacítica.

Para la evaluación de adsorción en toba dacítica de malla 14 con solución de caliza manganesífera precipitada, los resultados de adsorción para  $Mn^{2+}$  fueron de 96.9% en las primeras cuatro horas, este resultado es excelente en comparación con los anteriores de toba dacítica de malla 10, sin embargo la fracción colectada es muy pequeña (480 ml) y realizando los cálculos de intercambio iónico da un resultado de 0.06 meq/g el cual es muy bajo, pues se considera ideal 2 meq/g para este proceso.

La toba dacítica de la cantera de Tezoantla Hgo, se puede usar como material adsorbente, sin embargo se debe tener en cuenta las características cualitativas y cuantitativas de la solución sintética o agua natural que se va a tratar, con el fin de conocer las limitantes en el proceso de adsorción, así mismo, si las concentraciones del o los elementos que se desea eliminar son muy altas (<200 mg/l por ejemplo) se debe contemplar un pre-tratamiento químico o físico para que los resultados de adsorción sean mayores.

## 6.1 Recomendaciones y sugerencias

Utilizar una zeolita pura como referencia para determinar la capacidad de retención de la zeolita de interés con el ion del elemento de estudio.

Eliminar iones interferentes en el estudio de adsorción o intercambio iónico para incrementar la capacidad de retención del adsorbente.

Evaluar con otros pre-tratamientos físico-químicos como la oxidación reducción, cloración y aireación la eliminación de elementos presentes en solución acuosa.

Experimentar en granulometrías más finas de toba dacítica para evaluar si la capacidad de adsorción es más eficiente.

Evaluar la capacidad de adsorción en intervalos de tiempo más pequeños a los utilizados para conocer hasta que momento existe la capacidad de adsorción.

Se sugiere utilizar los residuos mineros de la cantera de Tezoantla, Hgo, como material adsorbente en el tratamiento de agua.

## GLOSARIO

**Coagulación/Floculación:** Es un procedimiento químico y físico por el cual las partículas que son demasiado pequeñas para separarse por sedimentación simple se desestabilizan y se aglomeran para acelerar su asentamiento.

**Color:** Es una propiedad física que indirectamente describe el origen y las propiedades del agua. La coloración indica la posible existencia de óxidos metálicos, como puede ser el óxido de hierro, la cual da al agua un color rojizo.

**Demanda bioquímica de oxígeno:** La DBO es definida como la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias para estabilizar la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias.

**Demanda química de oxígeno:** Este otro tipo de prueba consiste en determinar la cantidad total de materia orgánica; prácticamente toda la materia orgánica es oxidada a bióxido de carbono y agua.

**Diagenético:** Relativo a la diagénesis, es la alteración física, química o biológica de los sedimentos, que se convierten en rocas sedimentarias, a temperaturas y presiones relativamente bajas, que puede producir cambios en la mineralogía y la textura original de la roca.

**Filtración:** La filtración es el proceso del retiro de sólidos suspendidos del agua mediante del agua a través de una tela permeable o una cama de materiales poros; es la operación de separación sólido fluido en la que se produce la separación de partículas sólidas o gotas de líquidos o gases a través de un medio filtrante.

**Filtración por membrana:** Se emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso

molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película.

**Hidro craqueo:** Es un proceso en dos fases que combina el craqueo catalítico y la hidrogenación, y por medio del cual las fracciones de destilado se descomponen en presencia de hidrógeno y catalizadores especiales dando lugar a productos de más valor.

**Hidroisomerización:** Obtención de isómeros de n-parafinas con ayuda de catalizadores bifuncionales (función ácida y función hidrogenante-deshidrogenante) basados en zeolitas.

**Metales tóxicos:** Algunos metales como cromo, níquel, cadmio, mercurio, plomo, arsénico, selenio etc., presentan toxicidad. La ingestión de ellos aun en cantidades mínimas pero durante un largo período como es una vida promedio puede causar daños en el organismo incrementando el riesgo de aparición de tumores, enfermedades en órganos vitales como aparato digestivo, respiratorio y reproductivo.

**Minerales autógenicos:** Mineral formado en el propio medio y lugar en que se encuentra.

**pH:** Por definición es el logaritmo inverso de la concentración de ión hidrogeno. Un pH menor de 7.0 indica acidez en el agua, cuanto menor sea el valor del pH mayor es la concentración de iones de hidrogeno y mayor es la acidez.

**Sedimentación:** Es la forma de tratamiento de agua potable y de agua residual más antigua y de uso más extendido, emplea el asentamiento por gravedad para separar las partículas del agua. Es un método relativamente sencillo y económico que se puede aplicar en estanques redondos, cuadrados o rectangulares.

**Sólidos disueltos:** Son lo que constituyen las sales que se encuentran presentes en el agua y que no pueden ser separados del líquido por algún medio físico tal como la sedimentación, filtración etc.

**Sólidos en suspensión:** Material que se encuentra en fase sólida en el agua en forma de coloides o partículas sumamente finas y que causa en el agua la propiedad de turbidez. Cuanto mayor es el contenido de sólidos en suspensión, mayor es el grado de turbidez.

**Sólidos totales disueltos:** Es la suma de los sólidos disueltos en suspensión que la muestra de agua pueda contener.

**Temperatura:** Parámetro físico de suma importancia para los ecosistemas hidráulicos; cuando la temperatura aumenta, disminuye la concentración de oxígeno disuelto y si las aguas son deficientes en oxígeno esto puede ocasionar la muerte de especies acuáticas, especialmente peces.

**Turbidez:** Capacidad que tiene la materia finamente dividida o en estado coloidal de dispersar la luz, que se relaciona con el contenido de sólidos finamente divididos que se presentan en agua.

**Zeopónico:** Uso de la zeolita como sustrato y fertilizante del suelo, para el cultivo de hortalizas.

## BIBLIOGRAFÍA

Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. IGME. 1-7p.

Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Rodríguez, J., Quintana, C., Terrazas, C., y otros. (2009). Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: Multequina. 18: 53-69p.

Ambruster, T., & Gunter, M. (2001). Crystal Structures of Natural Zeolites. Mineralogical Society of America. 45: 69-116p.

Arboleda, V. (1972). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). 13:356-459p.

ATSDR, (2012). Toxicological profile for Manganese. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm>. consultado el 10 de enero del 2016.

Barba, L. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. E.Tesis licenciatura. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de recursos naturales y del ambiente, Área académica de ingeniería sanitaria y ambiental. 1-43p.

Barrón, M. (2003). Intercambio iónico de plomo, zinc y níquel en una toba. Tesis de licenciatura. UNAM. 2-53p.

Bender, M.L., (1972). Manganese Nodules, in: Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Science, Volume IV (ed. R.W. Fairbridge). 673-7p.

CAMIMEX.(2012).CAMIMEX.ORG.MANGANESO.<https://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/uso-de-los-metales/manganeso/> consultado el:17 de febrero del 2016.

Carbotecnia. (2014). Carbotecnia, Tratamiento de agua y aire, Medios Granulares: <https://www.carbotecnia.info/PDF/medfiltrantes/Zeolita.pdf>. consultado el: 18 de mayo de 2018

Carriazo, J.-G., Uribe, P., & Hernández, F. (2007). Diagramas de predominancia, de Frost y de Pourbaix: tres contextos para desarrollar competencias en procesos de óxido-reducción. Scientia et Technica Año XIII,(14): 569-574p.

Castro, S 2013. CMAL. La minería y consecuencias en México. <https://www.ocmal.org/la-mineria-y-consecuencias-en-mexico/>. consultado el: 13 de febrero del 2018

- Córdova, R., Garcell-Puyáns, L., & Rodríguez Iznaga, I. (2018). Remoción del cromo de residuales alalinos con zeolita natural en una columna de adsorción de lecho fijo. *SciELO*, 38(2): 210-220p.
- Costafreda, M. (2011). Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales. *Rocas y Minerales Industriales* 1: 4p.
- Cuchimaque, L., Vargas, F., & Ríos, R. (2013). Remoción de Fe y Mn en aguas naturales por adsorción-oxidación sobre clinoptilolita. *SciELO*, 24-43p.
- Curi, A., Granada, W., Lima, H., & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *SciELO* , 17 (6), 111-118p.
- Demant, A. (1975). Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. *Revista del Instituto de Geología* , 75 (1), 66-79p.
- DLEP, D. (2017). Manganeso y compuestos inorgánicos. *Red Española de Seguridad y Salud en el Trabajo*. (112):1-13p.
- Eróstegui-Revilla, C. (2009). Contaminación por metales pesados. *Ciencia Médica*. (1):45-46p.
- FEA, F. (2006). El agua en México: lo que todos debemos saber. *CEMDA*. 1, 36-37p.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53: 84-92p.
- Ferré Huguet, N., & Schuhmacher, M. (2006). Metales Pesados y salud. *Mapfre seguridad*. 108: 51p.
- Flores, C. (2015). Mineralogénesis en el manto manganesífero(resumen). *Congreso Nacional de Geoquímica, Linares, Nuevo León* .2015; 21, 60-63p.
- Geyne A.R., Fries, Segerstrom K., Black R.F., Wilson I.F (1963). *Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte District, state of Hidalgo, México*. Consejo de recursos no renovables. 5E:222p.
- Gómez, T., Orozco, E., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcanica Transmexicana. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana* , *Commemorativo del Centenario*, 227-283p.
- Huanca, P., Paredes, B., Rodríguez, M., Gonzáles, D., Tejada, R., & Chavéz, J. (2018). Caracterización y aplicación de una zeolita natural de Ocuvi (Perú) para la remoción de Pb (II) en solución a nivel laboratorio. *Avances en Ciencias e Ingeniería* , 9 (3), 1-12p.



INCYTH. (2003). Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad. Secretaría de la nación, Ministerio del interior, obras públicas y vivienda.:Info Leg. Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación 1-123P .

INEGI. (2011). Cuentame Territorio.de <http://cuentame.inegi.org.mx/mapasitio/default.aspx?tema=MS>. consultado el 16 de febrero del 2016.

INEGI. (2009). México Cifras. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Mineral del Monte Hidalgo: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/13/13039.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13039.pdf). consultado el 27 de enero del 2016.

Islas, N., Flores, C., & Sierra, T. v. (2014). Evaluación de esmectitas y zeolitas naturales para ser utilizadas en catálisis y craking de hidrocarburos (extenso). Congreso Nacional de Geoquímica. 20 (1), 101-103p.

J.C.A, J. (2003). Contaminación del Agua. Puerto Rico: Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

Lenntech. (2017). Manganese. universidad técnica de Delft. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm>. Consultado el: 22 de enero del 2016.

Leyva, R., Medellín, C., Guerrero, C., Berber , M., Aragón, P., & Jacobo, A. (2005). Intercambio iónico de plata (I) en solución acuosa sobre clinoptilolita. Scielo, 21(4):193-200p.

Mendoza Córdova, A., Flores Valenzuela, J., Flores Acosta, M., Vidal Solano, J., & Paz Moreno, F. (2014). Estudio sobre la incorporación y retención de plomo en zeolita natural. Epistemus. 16-19p.

Montiel , G., & Ibinarriaga, M. (2016). Efecto de la concentración, pH y velocidad de flujo en la remoción de Mn<sup>2+</sup> en agua sintética utilizando clinoptilolita (extenso). Congreso Nacional de Geoquímica, 22, 183-190p.

Muñoz, J. (1986). La minería en México. Bosquejo histórico. Quinto centenario (11):143-1156p.

Okita. (1992). Manganese Carbonate Mineralization in the Molango District, México. Econ.

Ostrooumov, M. (2006). Zeolitas de México. Diversidad Mineralógica y aplicaciones. México. Mineralog. 22:2-9p

Passaglia, E., & Sheppard, R. (2001). Natural Zeolites. Mineralogy and Geochemistry, Washington DC. Mineralogical Society of America and Geochemical Society. 45.:163-206p

Petkova, V. (1997). Uso de zeolitas naturales en la remoción de manganeso. *Ingeniería Hidráulica de México*, 12 (3), 41-49p.

Piña, S., Rivera, H., & Ramírez, G. (2012). Remoción de hierro y manganeso en fuentes de agua subterránea para abastecimiento público. *Red Iberoamericana de potabilización y depuración del agua*, 37-53p.

Ponce, O. (2005). Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada. Tesis de licenciatura. Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.1-13p.

Price, M. (2003). Agua Subterránea. Necesidades de calidad del agua. México: Limusa.390-420p.

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, investigación y desarrollo*. 16 (2):66-67p.

Santander, D. J. (2015). Estudio geoquímico - mineralógico del yacimiento manganesífero.(Extenso). *Congreso Nacional de Geoquímica*.21 (1), 54-55p.

Segerstrom, K, (1962), *Geology of south-central Hidalgo and notheastern México*. Geological survey bolletin. 1104:84-162p.

Sierra, T., Flores, C., Ramírez, C., Marmolejo, S., Pérez, M., & Prieto, G. (2014). High efficiency of tuff quarryng residuals an their associated mordenite for adsorbing chromium and lead from aqueous solutions. *Journal of Materials and Enviromental Science*, 6 (2), 465-472p.

Sierra Trejo Pamela Viridiana (2014). Estudio de materiales geológicos para ser utilizados como adsorbentes de Pb y Cr en soluciones acuosas. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 13-81p

SGM. (2016). Panorama Minero del Estado de Hidalgo. GEOInfoMex. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf> cnsultado el: 20 de marzo del 2017.

Vázquez, B. R. (2016). Cartografía Geológica de la sucesión de eventos volcánicos en la cantera de Tezoantla, municipio de Mineral del Monte, Hidalgo (México). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 25-49p

Wayne, J. (2002). Earthworks. Drenaje Ácido Generado por la Minería., Defiende la Sierra.1-2p

Williams, M. (2012). Toxicological profile for manganese. Atlanta, Georgia, USA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.1-204p