



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

DESINFECCIÓN DE AGUA MEDIANTE UN FILTRO A BASE DE ZEOLITA (CLINOPTILOLITA)

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

ESPECIALIDAD EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

PRESENTA:

KARLA MIRIAM HERNÁNDEZ MATA

HERMOSILLO, SONORA

JUNIO 2010

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 09 de Junio de 2010.

M.C. JESÚS LEONEL SERVÍN RODRÍGUEZ
Jefe del Departamento
Ingeniería Química y Metalurgia


Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar el Trabajo Profesional: "**Desinfección de Agua Mediante un Filtro a Base de Zeolita (Clinoptilolita)**", presentada por:

KARLA MIRIAM HERNÁNDEZ MATA

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

Ingeniero Químico
(Especialidad Ingeniería de Alimentos)

14/Junio/2010
Fecha


M.C. JESÚS LEONEL SERVÍN RODRÍGUEZ

14/Junio/2010


DR. AGUSTÍN GÓMEZ ALVAREZ

11/Junio/2010


Q.B. MARÍA ELENA OCHOA LANDÍN

11/Junio/2010


ING. JUAN ANTONIO JIMÉNEZ RUÍZ

Dedicatoria

A mis padres Enrique y Rosalía, por su esfuerzo y apoyo incondicional, consejos y ejemplo de vida. Gracias por todos los momentos de dicha, guía y empeño que me dieron, dan y seguirán dando para mi beneficio. Muchas gracias por todo esto y más, los quiero mucho.

A mis hermanos Isaac y Jesús, quienes iluminaron mi vida, los quiero.

A mis tías: Magy's, Lucy, Letty, Mary, Yuya, Iveeth, Elí y Blanca quienes siempre me brindaron su amistad y apoyo incondicional y especialmente por estar siempre al pendiente de mí.

A mi abuelo, quien formo una parte fundamental en todo mi carrera y estuvo al pendiente de mí en todo momento, gracias abuelo se te quiere.

A mi prima Vanne, quien siempre estuvo ahí para apoyarme, aconsejarme y sobre todo soportarme.

A mis amigos Sara, Nereyda, Juan Carlos y Julieta, gracias por sus palabras de aliento y apoyo que me brindaron.

Especialmente a Luis Carlos quien formó parte de la realización de este trabajo, por sus consejos, su apoyo incondicional y formar parte fundamental en mi vida.

A todas aquellas personas que de alguna manera pusieron su granito de arena para la realización de este trabajo. Gracias por ese tiempo que tuvieron para mí, se los agradezco.

Y principalmente a Dios que me permitió ser y disfrutar de este momento y otorgar este esfuerzo a las más grandes personas que siempre llevaré en mi corazón.

Agradecimientos

A la Universidad de Sonora (UNISON), por ser más que una institución y brindarme esa preparación para formarme como profesionista.

Al profesor M.C. Jesús Leonel Servín Rodríguez por su ayuda y paciencia en la revisión de este trabajo y apoyo en todos los trámites que se realizaron.

Al profesor Luis Ángel Muñoz Lastra por facilitarme el conocimiento e información importante para la realización de esta investigación.

A la profesora María Elena Ochoa por la disposición de su tiempo y amabilidad mostrada en todo momento.

Al Dr. Agustín Gómez Álvarez por su ayuda y siempre bien recibidos comentarios y sugerencias para esta tesis.

Al M.C. Juan Jiménez por sus comentarios, sugerencias y apoyo en la realización de este trabajo.

A especialmente a todos mis profesores quienes indirecta y directamente contribuyeron en mi formación profesional.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS | III |
| LISTA DE TABLAS | IV |
| RESUMEN | V |
| INTRODUCCIÓN | VI |
| OBJETIVOS | VII |
| | |
| I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | |
| 1. 1 Zeolita | 1 |
| 1.1.1 Definición | 1 |
| 1.1.2 Características Químicas | 2 |
| 1.1.3 Clasificación | 3 |
| 1.1.4 Propiedades principales | 5 |
| 1.1.5 Aplicaciones | 5 |
| 1.1.6 Depósitos de zeolita en Sonora | 6 |
| 1.2 Tecnología de desinfección del agua | 6 |
| 1.2.1 Desinfección Química | 7 |
| 1.2.2 Desinfección Física | 10 |
| 1.3 Plata | 11 |
| 1.3.1 Características | 12 |
| 1.3.2 Aplicaciones | 12 |
| | |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | |
| 2.1 Zeolita Clinoptilolita | 13 |
| 2.2 Río San Miguel | 14 |
| 2.3 Preparación del filtro | 15 |
| 2.4 Preparación de zeolita | 16 |
| 2.5 Activación de zeolita | 17 |
| 2.5.1 Activación de zeolita con Yodo | 18 |
| 2.5.2 Activación de zeolita con Cloro | 18 |
| 2.5.3 Activación de zeolita con Plata | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6 Adsorción de plata en la zeolita | 20 |
| 2.7 Fijación y/o estabilización de la plata en la zeolita | 20 |
| 2.7.1 Cementación Natural | 21 |
| 2.7.2 Cementación Asistida | 23 |
| 2.8 Análisis Estadístico | 24 |
| | |
| III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | |
| 3.1 Zeolita Clinoptilolita | 27 |
| 3.2 Río San Miguel | 30 |
| 3.3 Filtro a partir de Zeolita | 31 |
| | |
| IV. CONCLUSIONES | 41 |
| V. RECOMENDACIONES | 42 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 43 |
| | |
| APÉNDICES | |
| Apéndice A. Procedimiento de muestreo | 46 |
| Apéndice B. Control de calidad de la microbiología | 48 |
| Apéndice C. Normas y Criterios de Calidad Mexicanas | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Estructura típica de las zeolitas | 2 |
| 2 | Localización geográfica del yacimiento de Clinoptilolita | 13 |
| 3 | Localización geográfica del muestreo en el Río San Miguel | 14 |
| 4 | Diagrama esquemático para la desinfección de agua por medio del filtro | 16 |
| 5 | Contacto directo del zinc con la zeolita activada en solución de nitrato de potasio | 21 |
| 6 | Prototipo de los tanques interconectados | 22 |
| 7 | Proceso separado del zinc y la zeolita activada en solución de nitrato de potasio | 22 |
| 8 | Contacto directo del zinc con la zeolita activada en solución de nitrato de potasio, con 2 volts de corriente eléctrica | 23 |
| 9 | Proceso separado del zinc y la zeolita activada en solución de nitrato de potasio y con corriente eléctrica de 2 volts | 24 |
| 10 | Difractograma de Rayos X de la Clinoptilolita (zeolita natural) | 28 |
| 11 | Análisis Termogravimétrico (TGA) de la Clinoptilolita (zeolita natural) | 29 |
| 12 | Prototipo del filtro para la desinfección de agua del Río San Miguel | 31 |
| 13 | Prototipo para la desinfección de agua por medio del filtro | 32 |
| 14 | Microscopía de Electrónica Barrido de la Zeolita Clinoptilolita | 36 |
| 15 | Microscopía de Electrónica Barrido de la Zeolita con nitrato de plata | 36 |
| 16 | Microscopía de Electrónica Barrido de la zeolita con plata coloidal interior | 37 |
| 17 | Microscopía de Electrónica Barrido de la Zeolita con plata coloidal superficial | 37 |
| 18 | Comportamiento de la desinfección del agua del Río San Miguel | 39 |

LISTA DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|--------------|---|---------------|
| 1 | Propiedades de las zeolitas | 3 |
| 2 | Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de los poros | 3 |
| 3 | Clasificación estructural de las zeolitas | 4 |
| 4 | Composición química de la clinoptilolita | 27 |
| 5 | Determinación de las características superficiales de la clinoptilolita | 27 |
| 6 | Propiedades fisicoquímicas del agua del Río San Miguel | 30 |
| 7 | Resultados microbiológicos del agua del Río San Miguel | 31 |
| 8 | Resultados de blancos utilizados en el control de calidad para la microbiología | 33 |
| 9 | Matriz de muestreo del agua recolectada en el Río San Miguel | 33 |
| 10 | Comportamiento microbiológico según el tipo de activación en la zeolita | 34 |
| 11 | Contenido de plata y zinc en la zeolita activada | 34 |
| 12 | Análisis microbiológicos para los diferentes procesos de activación de la zeolita con plata | 35 |
| 13 | Resultados microbiológicos del agua desinfectada | 38 |
| 14 | Análisis Estadístico | 40 |

RESUMEN

Se realizó un estudio de la desinfección de agua con la finalidad de eliminar microorganismos que son dañinos para la salud, a partir de un mineral activado de zeolita (*Clinoptilolita*). Experimentalmente se generaron datos microbiológicos a partir de los diferentes métodos de activación de la zeolita natural, con cloro, iodo y plata. Se observó que el nitrato de plata es adecuado para la eliminación de microorganismos. Por tal motivo, se determinó el procedimiento más adecuado para obtener zeolita activada a partir de nanopartículas de plata, por medio del proceso de cementación natural y asistida con 2 volts. Adicionalmente se realizaron análisis microbiológicos al agua del Río San Miguel, (Municipio de San Miguel de Horcasitas), los cuales exceden Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial de la Federación (S.E.D.U.E., 1989). Posteriormente, para la realización del filtro se manejaron 7 g de zeolita activada con plata coloidal y un flujo descendente de 50 ml/min, obteniendo un tiempo de residencia de 7.5 segundos y una eficiencia satisfactoria en la eliminación total de microorganismos patógenos y mesófilos presentes en la muestra tratada del Río San Miguel. Se analizó estadísticamente a partir de la varianza bi-factorial de Friedman, ($\alpha = 0.95$ de confiabilidad), para aceptar H_0 , la cual determina que la zeolita Clinoptilolita activada con plata coloidal elimina los microorganismos en número y tipo que lo clasifiquen, según la NOM-127-SSA1-1994 y genere agua potable.

INTRODUCCIÓN

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el agua cubre el 75% de la superficie terrestre; el 97,5% del agua es salada, sólo el 2,5% es dulce. Los casquetes de hielo y los glaciares contienen el 74% del agua dulce del mundo. La mayor parte del resto se encuentra en las profundidades de la tierra o encapsulada en la tierra en forma de humedad. Sólo el 0,3% del agua dulce del mundo se encuentra en ríos y lagos. Para uso humano se puede acceder, a menos del 1% del agua dulce superficial subterránea del planeta. ^[16]

En México, las estadísticas muestran que 2,3 billones de personas viven en regiones con estrés hídrico y que alrededor de 1,7 billones viven en regiones con escasez de agua. La situación empeorará con el paso de los años. Una mejor conservación del agua y sus recursos y control de la contaminación del agua son parte de la solución. ^[27]

El agua cruda contiene diversas sales disueltas, materia orgánica como: grava, arena gruesa, arena fina, arcilla, bacterias, partículas coloidales, etc. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo algunos procesos de tratamiento para purificarla y ponerla en óptimas condiciones para el consumo humano. ^[13] Para ello se cuenta con reportes que se han enfocado a encontrar alternativas para la desinfección de agua potable más económicas y accesibles para las personas. La investigación se realizará con el fin de obtener un proceso para la purificación y desinfección de agua a partir de un filtro de zeolita activada, y obtener agua libre de microorganismos patógenos. Por lo cual, se mostraran los datos obtenidos en los diversos análisis para la desinfección de agua por medio de la activación de zeolita con plata coloidal, y con los resultados se realizara una comparativa con otros tipos de activación, para determinar las condiciones optimas del filtro.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desinfección de agua con la finalidad de eliminar microorganismos que son dañinos para la salud a partir de un filtro con mineral activado de zeolita Clinoptilolita.

Objetivos Específicos

1. Construcción de un filtro portátil, a partir de zeolita activada y así llevar a cabo la desinfección del agua del Río San Miguel, en el lugar donde se localiza el municipio de San Miguel de Horcasitas.
2. Determinar los procedimientos de activación de un mineral de zeolita natural como medio desinfectante.
3. Evaluar la efectividad del filtro en la eliminación de agentes patógenos, a partir de análisis microbiológicos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1.- Zeolita

Las zeolitas forman una familia de más de 80 especies minerales, los mineralogistas han investigado estas rocas desde hace 200 años. La primera zeolita fue descubierta en 1756 por Axel Frederick Cronstedt, mineralogista suizo, que le puso el nombre, tomado del griego "piedra que hierve" en base a la propiedad que tienen de perder el agua al ser calentadas. Hacia 1920 ya se sabía que estos minerales poseían propiedades de absorción selectiva de sustancias por lo que fueron llamados "tamices moleculares".^[18] A fines de la década de los 40 ya existía una gran demanda comercial pero la escasez de materias primas hizo que comenzará el desarrollo de zeolitas sintéticas. Hoy en día, coexisten en el mercado las zeolitas naturales y sintéticas teniendo mayor valor comercial estas últimas, debido que poseen una gran variabilidad en el compuesto al tamizar. Las zeolitas naturales son recursos geológicos relativamente abundantes en áreas volcánicas e intrusivas.^[18]

1.1.1.- Definición

Las zeolitas provienen de una familia de minerales, son aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimo de 3 a 10 angstroms, y cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimientos permitiendo el intercambio iónico y la deshidratación reversible.^[2] Además, estos minerales con grupo estructural y químicamente son parecidos a los feldespatos

(aluminosilicatos de sodio y calcio), pero están hidratados. ^[9] El agua puede perderse fácilmente (con un incremento pequeño de la temperatura), sin que altere su estructura (a diferencia de otros minerales). Los huecos dejados por las moléculas de agua; debido a la estructura abierta, puede ser ocupada por cualquier tipo de moléculas o iones. El agua que entra y sale de la estructura intercambia iones que lleva en disolución con los del mineral. Debido a esta propiedad, las zeolitas se han sintetizado y se usan como ablandadores de agua, ya que intercambian el catión calcio del agua dura por el ión sodio que está en la red. ^[9]

1.1.2.- Características Químicas

Las zeolitas están formadas por armazones de tetraedros de AlO_4 y SiO_4 , y cantidades variables de Na^+ , Ca^+ y K^+ principalmente, que se alojan en los canales y cavidades internas de la estructura, las moléculas de agua están débilmente ligadas por enlaces de hidrógeno a los átomos aniónicos de la estructura. En la Figura 1, se muestra la estructura típica de las zeolitas ^[20]

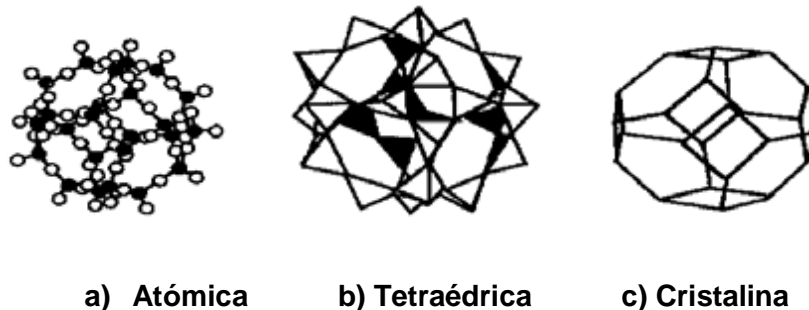
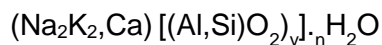


Figura 1.- Estructura típica de las zeolitas.

La fórmula general de las zeolitas se describe como ^[21]:



En la Tabla 1 se muestran algunas propiedades importantes de las zeolitas. [28]

Tabla 1.- Propiedades de las Zeolitas

| PROPIEDAD | VALOR |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Diámetro de poro | 2 a 12 Å |
| Diámetro de cavidades | 6 a 12 Å |
| Superficie interna | 500-1000 m ² /g |
| Capacidad de intercambio catiónico | 0 a 650 meq/100g |
| Capacidad de adsorción | <0.35 cm ³ /g |
| Densidad real | 2.24 mg/m ³ |
| Estabilidad térmica | Desde 200°C hasta más de 1000°C |

Fuente: [28]

1.1.3.- Clasificación

Las zeolitas se clasifican respecto al tamaño de los poros como se muestra en la Tabla 2 [28]. En la Tabla 3, se muestra la clasificación existente de zeolitas naturales por grupo, acompañada por su fórmula química correspondiente. [21]

Tabla 2.- Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de los poros.

| Zeolita | Átomos que forman la abertura | Diámetro de poro θ (Å) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Poro extragrande | 18 | $\theta > 9$ |
| Poro grande | 12 | $6 < \theta < 9$ |
| Poro mediano | 10 | $5 < \theta < 6$ |
| Poro pequeño | 8 | $3 < \theta < 5$ |

Fuente: [28]

Tabla 3.- Clasificación estructural de las zeolitas.

| Nombre | Formula Química |
|--------------------------|--|
| Grupo de las analcimas | |
| Analcimas | $\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$ |
| Wairakita | $\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$ |
| Leucina | $\text{K}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$ |
| Grupo de las natrolitas | |
| Natrolita | $\text{Na}_2(\text{Al}_6\text{Si}_{24}\text{O}_{30})16\text{H}_2\text{O}$ |
| Edingtonita | $\text{Ba}_2(\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}) 6\text{H}_2\text{O}$ |
| Thomsonita | $\text{Na}_4\text{Ca}_8(\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}) 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las filipsitas | |
| Filipsita | $(\text{K},\text{Na})_5(\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}) 10\text{H}_2\text{O}$ |
| Garronita | $\text{NaCa}_{16}(\text{Al}_5\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) 14\text{H}_2\text{O}$ |
| Gismondita | $\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) 16\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las heulanditas | |
| Heulandita | $\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Clinoptilolita | $\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Estilbita | $\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}) 32\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las mordenitas | |
| Mordenita | $\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Ferrierita | $\text{Na}_{15}\text{Mg}_2(\text{Al}_{5,5}\text{Si}_{30,5}\text{O}_{72}) 18\text{H}_2\text{O}$ |
| Epistilbita | $\text{Ca}_3(\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las chabasitas | |
| Chabasita | $\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}) 13\text{H}_2\text{O}$ |
| Edionita | $(\text{Ca},\text{MgNa},\text{K})_{4,5}(\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 27\text{H}_2\text{O}$ |
| Zeolita L | $\text{K}_6\text{Na}_3(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 21\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las faujasitas | |
| Faujasitas (X, Y) | $\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}(\text{Al}_{59}\text{Si}_{153}\text{O}_{384}) 26\text{H}_2\text{O}$ |
| Zeolita A | $\text{Na}_{12}(\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}) 27\text{H}_2\text{O}$ |
| Zeolita ZK-5 | $\text{Na}_{30}(\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}) 98\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las laumontitas | |
| Laumontita | $\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$ |
| Yugawaralita | $\text{Ca}_{16}(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$ |
| Grupo de las pentasil | |
| Zeolita ZSM-5 | $\text{Na}_n(\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}) 16\text{H}_2\text{O}$ |

Fuente: [21]

1.1.4.- Propiedades principales

Las aplicaciones comerciales de las zeolitas, se encuentran en función de sus propiedades físico-químicas, como son su capacidad de intercambio iónico, la adsorción, y la deshidratación-hidratación como procesos físicos. Tal como se ha indicado anteriormente, todas estas propiedades están asociadas, su estructura, armazón molecular, y a su composición catiónica. ^[14]

La Adsorción: A condiciones ambientales, la cavidad central, así como sus canales, se encuentran repletos por moléculas de agua en forma de esferas que rodean a los cationes intercambiables. Si el agua es desplazada a temperatura adecuada (según el tipo de zeolita), éstos serán capaces de adsorber moléculas cuyo diámetro sea inferior al de la cavidad central, es decir, que adsorben algunas moléculas, mientras que otras no las dejan pasar. ^[14]

Hidratación-Deshidratación: Es un fenómeno físico que varía en función de la presión y temperatura, así como de su armazón estructural, siendo el efecto directo endotérmico, y la rehidratación exotérmico. La importancia de esta propiedad es porque ocurre sin que se produzca alteración en el armazón estructural de estos minerales. ^[14]

1.1.5.- Aplicaciones

Las zeolitas sintéticas son los catalizadores más importantes en las refinerías petroquímicas. La única producción de importancia real en Latinoamérica tiene lugar en Cuba, segundo productor mundial, con 500.000 toneladas por año, después de China con 2.500.000 toneladas por año y delante de Japón con 150.000 toneladas por año. Esta producción, que corresponde al 16% del total mundial, se utiliza principalmente en

agricultura, camas para gatos y medicina, en mercados internos y externos, en el refinamiento del petróleo, producción de diesel e industria petroquímica.^[1]

1.1.6.- Depósitos de Zeolita en Sonora

En Sonora se han detectado cerca de 15 tipos de zeolitas. De manera general y con base en su carácter geológico es posible dividir estos depósitos en dos grupos: ^[11]

a) Paquetes de rocas piroclásticas félsicas, zeolitizadas por aguas meteóricas.

b) Cenizas volcánicas de grupos finos depositados en lagos y zeolitizadas por la acción de aguas connotadas.

Los principales depósitos en el estado de Sonora son: El Álamo en el municipio de Agua Prieta, San Pedro en el municipio de Ures, La Palma en el municipio de Divisaderos, Mesa del Álamo en el municipio de Magdalena de Kino, Los Coyotes y el Cajón en el municipio de Rayón, El Saúz en el municipio de Nacori Chico, La Salada en el municipio de Tubutama, Los Mezcales en el municipio de Álamos, Tatuachi en el municipio de Arizpe, Playa Noriega y El Retanque en el municipio de Hermosillo. ^[11]

1.2.-Tecnologías de Desinfección de Agua

El más importante requerimiento individual del agua potable es que debe estar libre de cualquier microorganismo que pueda transmitir enfermedades al consumidor. Procesos tales como almacenamiento, sedimentación, coagulación y floculación, y filtración rápida, reducen el contenido bacteriológico del agua. Sin embargo, estos procesos no pueden asegurar que el agua que producen sea bacteriológicamente segura. Por tal motivo se necesitará una desinfección final. En casos en los que no se dispone de otros métodos de tratamiento, se puede recurrir a la desinfección como único tratamiento

contra la contaminación bacteriana del agua potable. La desinfección del agua se encarga de la destrucción, o al menos de la desactivación completa, de los microorganismos dañinos presentes en el agua, utilizando medios físicos o químicos. ^[14]

1.2.1.- Desinfección Química ^[14]

Los compuestos químicos más utilizados para la desinfección del agua son:

- Cloro (Cl_2)
- Dióxido de cloro (ClO_2)
- Hipoclorito de sodio (NaClO)
- Ozono (O_3)
- Halógenos:
 - Bromo (Br_2)
 - Iodo (I_2)
 - Cloruro de bromo (BrCl_2)

Metales y sales:

- Cobre (Cu^{2+})
- Plata (Ag^+)
- Jabones y detergentes
- Sales de amonio y Permanganato de potasio (KMnO_4)
- Peróxido de hidrógeno

Cloro (Cl): El cloro es un reactivo químico importante para la purificación del agua. El cloro en agua es tres veces más efectivo como agente desinfectante contra *Escherichia coli* que una concentración equivalente de bromo, y más de seis veces más efectiva que una concentración equivalente de yodo. ^[22] La cloración de los abastecimientos públicos

de agua representa el proceso más importante usado en la obtención de agua de calidad sanitaria adecuada. El proceso es o será efectivo como lo sea el control que se ejerza. ^[12]

La desinfección del agua por el cloro tuvo lugar primeramente en 1908 en Bubbly Creek, Chicago, en la campaña de agua de Jersey City. En 1918, más de 1 000 ciudades tratan más de 3 billones de galones de agua por día, (1.1×10^7 m³/día), empleando cloro como agente desinfectante. ^[23]

Las ventajas y desventajas del cloro como desinfectante son: ^[30]

a. Ventajas:

- Existe disponible en gas, líquido o en forma granular.
- Es relativamente barato.
- Es fácil de aplicar.
- Por sus concentraciones que son insaboras e inocuas para el consumo humano.
- Tiene elevadas características de toxicidad para microorganismos.
- Agente oxidante poderoso.

b. Desventajas:

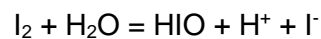
- Forma un gas venenoso que requiere manejo cuidadoso.
- Posee elevado grado de corrosividad en solución.
- Forma clorofenoles al reaccionar con el fenol, originando serios problemas de olores.
- Forma con algunas sustancias orgánicas trihalometanos, de los cuales el cloroformo es de máximo interés, por sospecharse que es un agente cancerígeno.

Tanto el cloro elemental gaseoso, como el líquido reaccionan con el agua de la siguiente forma:^[30]



Yodo (I₂): El yodo o iodo es de los cuatro halógenos (grupo 17) el de mayor masa atómica y el menos soluble en agua, (339 mg/L), así como el menos hidrolizable y el de menor potencial de oxidación; ofrece reactividad mínima con los componentes orgánicos. Por las características antes mencionadas, los residuos de yodo son más estables y persisten más tiempo en presencia de los materiales orgánicos o sustancias oxidables que los demás halógenos. ^[30]

El yodo elemental (I₂) reacciona con el agua, de la siguiente manera:



Los análisis realizados por Black, (citado por Jairo Romero, 1999) indican que, en general, las concentraciones menores de 1 mg/L de Iodo (I₂), no son detectables por color, olor o sabor. En general, la acción bacteriana del yodo es similar a la del cloro en cuanto a la influencia de la temperatura y el pH, pero se requieren dosis más altas de yodo para obtener los mismos resultados. Una de la ventaja del yodo sobre el cloro está en que el yodo no reacciona con el nitrógeno (N₂), por lo que no forma yodosisida, por lo tanto, es poco probable que el yodo reemplace al cloro dado a su alto costo y baja disponibilidad comercial. ^[30]

Plata (Ag): La plata solo tiene propiedades desinfectantes en su estado coloidal, esto es cuando se presenta en partículas extremadamente pequeñas que permanecen en

suspensión y que por su tamaño se cargan eléctricamente con mucha facilidad. En ese estado también es conocida como proteína de plata, sales de plata, proteína de plata ligera y proteína de plata fuerte. Las sales que se utilizan son: cloruro de plata y yoduro de plata. ^[14]

El empleo de la plata como desinfectante es muy antiguo, fué utilizada por los romanos para preservar el agua en jarras de almacenamiento, puesto que en concentraciones de 25 a 40 µg/L, es un buen desinfectante. ^[30]

La plata metálica es un buen bactericida que se puede obtener mediante el procedimiento denominado electrocátesis de acción oligodinámica de metales. Los iones de plata no son efectivos contra los virus ni los quistes. ^[31]

Propiedades de la plata Coloidal ^[19]

- Es un poderoso germicida frente a bacterias, hongos, levaduras y otros parásitos patógenos.
- Es un antiséptico muy potente.

Tiene pocas posibilidades de uso intensivo por su alto costo. Para desinfecciones de caudales pequeños existen equipos comerciales dotados con un lecho o columna de carbón activado impregnado con plata. ^[30]

1.2.2.- Desinfección Física ^[14]

Los procesos físicos más utilizados para la desinfección del agua son: el calor y la radiación con rayos ultravioletas.

Calor: es una práctica segura y tradicional que destruye microorganismos patógenos tales como virus, bacterias, quistes y huevos. Si bien es efectivo como tratamiento casero, no es un método factible para abastecimientos públicos de agua. Sin embargo, en situaciones de emergencia se puede usar como medida temporal.

La radiación de luz ultravioleta: es un método efectivo de desinfección para agua clara, pero su efectividad es reducida significativamente cuando el agua es turbia o contiene constituyentes tales como nitratos, sulfatos y hierro en su forma ferrosa. Este método de desinfección no produce ningún residuo que proteja al agua contra una nueva contaminación y que podría servir para propósitos de control y vigilancia. La luz ultravioleta ha sido usada para desinfección en varios países desarrollados, pero se le aplica muy rara vez en países en desarrollo.

1.3.- Plata

La plata es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad, es mencionado en el libro del Génesis, el cual indica que el metal comenzó a separarse del plomo al menos cuatro milenios antes de Cristo. ^[18]

La plata, como el resto de los metales, sirvió para la elaboración de armas de guerra y luego se empleó en la manufactura de utensilios y ornamentos de donde se extendió el comercio al acuñarse las primeras monedas de plata y llegando a constituir la base del sistema monetario de numerosos países. ^[18]

En 1516 Juan Díaz de Solís descubrió en Sudamérica el mar Dulce que posteriormente Sebastián Caboto denominó Río de la Plata, creyendo que allí abundaba el precioso metal, y de donde tomara el nombre la Argentina. Años más tarde, el hallazgo de grandes reservas de plata en el Nuevo Mundo en Zacatecas y Potosí en Bolivia y su

importación a Europa provocó un largo periodo de inflación que lejos de estancarse en España se difundió por Europa; el fenómeno fue estudiado por Earl Jefferson Hamilton que en 1934 publicó “El tesoro americano y la revolución de los precios en España”, 1501-1650. ^[18]

1.3.1.- Características

La plata es un metal de acuñar muy dúctil y maleable, algo más duro que el oro. Se mantiene en agua y aire, si bien su superficie se empaña en presencia de ozono, sulfuro de hidrógeno o aire con azufre, es posible obtener láminas de 0,00025 mm y con 1 g de metal fabricar un hilo de 180 metros de longitud. Tiene la más alta conductividad eléctrica de todos los metales, incluso superior a la del cobre, es decir, el conductor por excelencia, pero su mayor precio ha impedido que se utilice de forma masiva en aplicaciones eléctricas. La plata pura también presenta la mayor conductividad térmica, el color más blanco y el mayor índice de reflexión (aunque refleja mal la radiación ultravioleta) de todos los metales. Además se disuelve en ácidos oxidantes y puede presentar los estados de oxidación +1, +2 y +3, siendo el más común el estado de oxidación +1. El óxido y sulfato formado sobre la plata puede disolverse en ácido cítrico limpiándolo y formando citrato de plata. ^[17]

1.3.2.- Aplicaciones

De la producción mundial de plata, aproximadamente el 70% se usa con fines monetarios. Algunos usos de la plata se describen a continuación: ^[17]

- La plata se ha empleado para fabricar monedas, inicialmente con electrum, aleación natural de oro y plata, y más tarde de plata pura.
- En joyería y platería para fabricar gran variedad de artículos ornamentales y de uso doméstico cotidiano, y con menor grado de pureza, en artículos de bisutería.
- Catalizador en reacciones de oxidación.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Zeolita Clinoptilolita

Localización del depósito: En la Figura 2, se muestra la localización donde está ubicado el yacimiento de Clinoptilolita (zeolita natural), donde se recolectó las muestras para su estudio, en el municipio de Ures, Sonora, México, ubicado en las coordenadas geográficas 29° 29' 4.8" latitud Norte y 110° 19' 44.52" longitud Oeste.

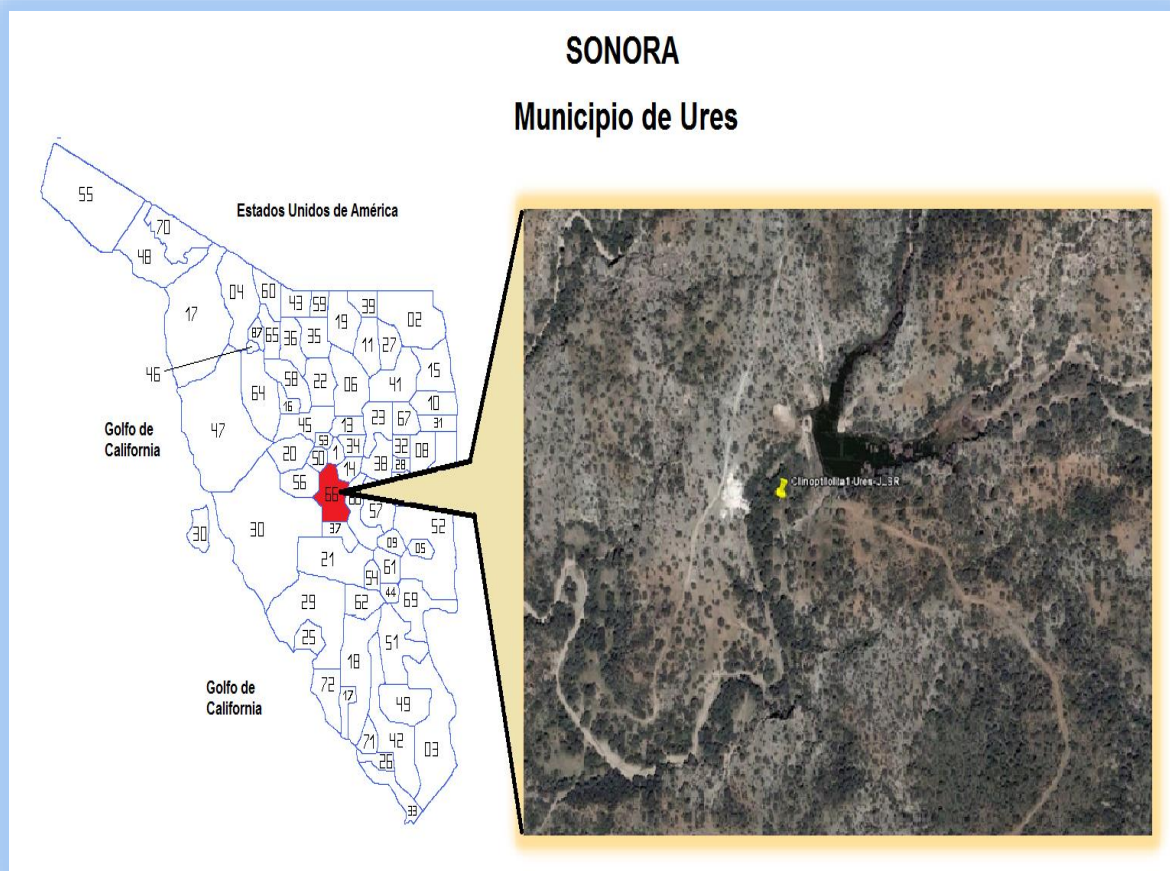


Figura 2.- Localización geográfica del yacimiento de Clinoptilolita (zeolita natural).

2.2.- Río San Miguel

Se recolectaron cuatro muestras de agua del Río San Miguel en las coordenadas geográficas 29° 28' 6.76' latitud Norte y 110° 44' 7.24" longitud Oeste, en el municipio de San Miguel de Horcasitas (Figura 3). El agua se recolectó de la parte central del río aproximadamente a unos 3 Km del poblado de San Miguel de Horcasitas, en el estado de Sonora, México, los muestreos fueron obtenidos de acuerdo al Manual de Métodos de Análisis,^[6] y el Manual de Aseguramiento de Calidad.^[5]

Con el fin de obtener resultados confiables y reproducibles que manifiesten el estado actual de un sistema acuático, se llevó a cabo el control de calidad antes del muestreo y durante su análisis. La metodología utilizada fue la recomendada por el Manual de Aseguramiento de la Comisión Nacional del Agua^[5]. Los resultados del presente trabajo fueron evaluados con los criterios y normas establecidas en México, los cuales establecen que las autoridades competentes podrán calificar a los diferentes cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuentes de abastecimiento.

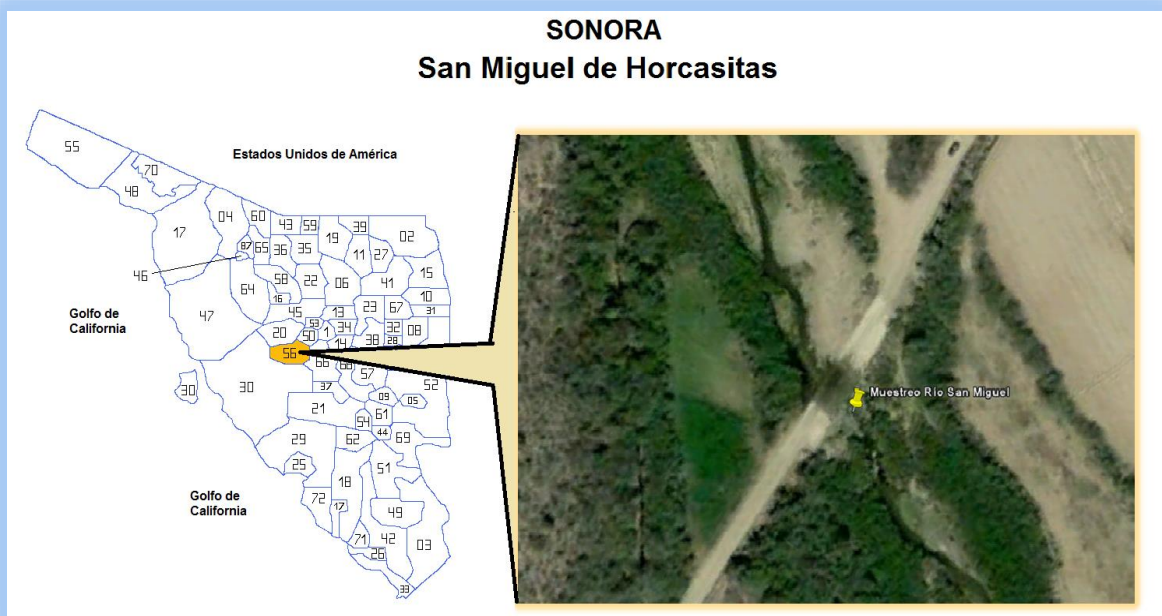


Figura 3.- Localización geográfica del muestreo en el Río San Miguel.

El agua del Río San Miguel fue comparado con los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de diciembre de 1989 ^[32].

Análisis Microbiológico: El control microbiológico consistió en la limpieza de equipos de muestreo, aseguramiento de la calidad de los medios de cultivo, control del área de siembra, control de equipo de laboratorio, control de reactivos, medios de cultivo y control durante el análisis. Así como los procedimientos de calibración y frecuencia, la toma de muestra de blancos, muestras duplicadas (precisión) y la exactitud, para observar el porcentaje de recuperaciones utilizadas en estándares de calidad. El procedimiento se presenta en el apéndice B.

2.3.- Preparación del filtro

1. En un tubo de Acrílico de 15 cm de largo por 1.25 cm de diámetro, se colocó una capa de 1 cm de arena sílica (previamente lavada y tamizada a 50 mallas), 8 cm de zeolita activada (7 g) y posteriormente 1 cm de arena.
2. El caudal de la bomba se fijó a $Q=50$ ml/min. Se tomaron 2,000 ml de agua del Río San Miguel, de los cuales, los primeros 100 ml son para estabilizar el filtro y el resto se utilizó para la investigación.
3. En la parte final del proceso de filtrado se encuentra una bolsa esterilizada, para la colecta del agua tratada y así poder realizar los análisis posteriores. En la Figura 4 se muestra el diagrama esquemático del prototipo para la desinfección de agua del Río San Miguel.

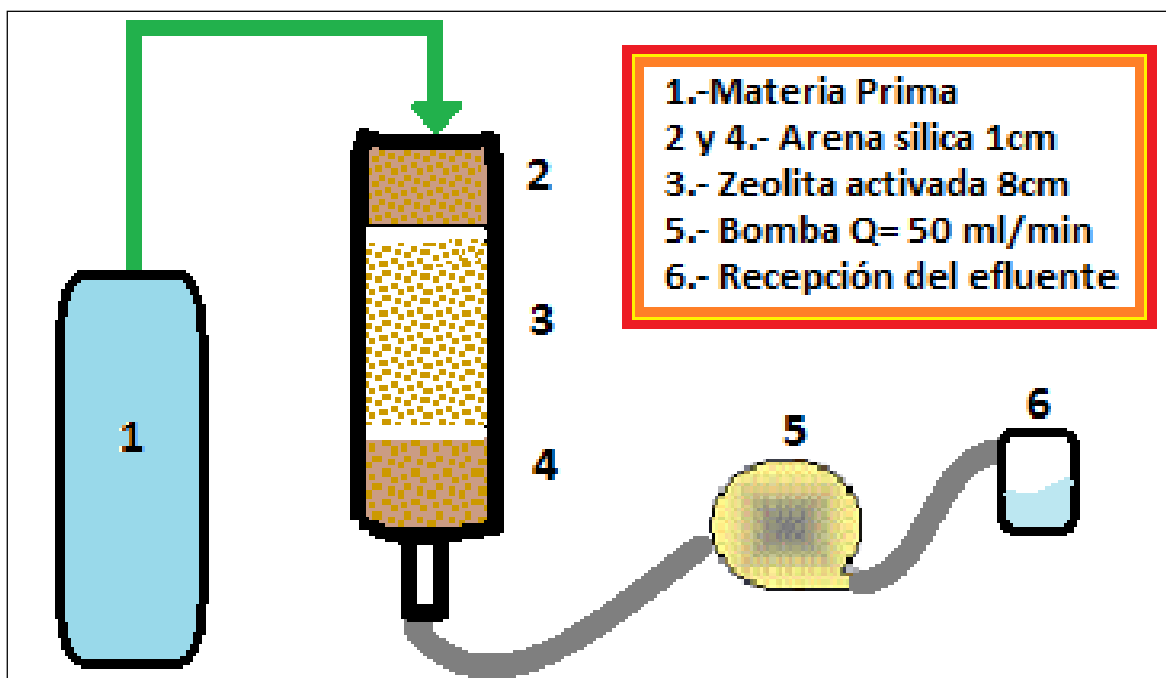


Figura 4.- Diagrama esquemático para la desinfección de agua por medio del filtro.

2.4.- Preparación de la Zeolita

La Zeolita se redujo de tamaño a través de una quebradora de quijada. El material de estudio se obtuvo a partir de una serie de tamizados entre 100 y 35 mallas USD Tayler, tomando como área de estudio un tamaño de partícula de 50 mallas (0.37 mm). Este se lavó con agua desionizada repetidamente hasta que se liberó por completo de polvos. Posteriormente se secó por 24 horas a 100°C en una estufa Tecno Dalvo. Finalmente se enfrió y se almacenó en un recipiente hermético para futuras pruebas.

2.4.1.- Difracción de Rayos X (DRX)

La identificación de la zeolita se llevó a cabo mediante la técnica de Difracción de Rayos X. Las muestras fueron preparadas previamente con el propósito de homogeneizarlas. Esta preparación consistió en la pulverización de las muestras hasta obtener un tamaño de partícula de -100 mallas. Posteriormente, los polvos fueron

colocados sobre porta muestras para su análisis en un Difractómetro de Rayos X (Philips 3040, localizado en el laboratorio de Microscopía del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora.

2.4.2.- Análisis Termogravimétrico (TGA)

Las muestras de zeolita con un peso aproximado de 7 mg se calentó hasta 500 °C con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C min⁻¹ por el método de rampa. Para este análisis se utilizó un equipo SDT 2960 simultaneous DSC-TGA TA instruments, ubicado en el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia en la Universidad de Sonora.

2.4.3.- Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Las microfotografías fueron tomadas a la zeolita natural, zeolita con nitrato de plata y a la zeolita con plata coloidal, con un microscopio electrónico de barrido JEOL (Scanning Electronic Microscope) 5410LV, con un haz de electrones de 15 kV de intensidad a alto vacío. Este estudio se realizó en el laboratorio de Microscopía del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora.

2.5.- Activación de la Zeolita

A continuación se describen las técnicas de desinfección utilizadas, para la elaboración de este proyecto. Los métodos utilizados fue la desinfección química, de la sección de los halógenos y metales, donde se encuentra el Iodo, Cloro y Plata, se manejaron por sus características desinfectantes para agua, ya que los desinfectantes no solo deben matar a los microorganismos sino que deben además tener un efecto residual, que significa que se mantienen como agentes activos en el agua después de la

desinfección para prevenir el crecimiento de los microorganismos provocando la contaminación del agua.

2.5.1 Activación de Zeolita con Yodo

- 1) Preparación de la solución de yodo: en 500 ml de agua destilada se agregó 3 g de Yodo y 9 g de Yoduro de potasio (KI).
- 2) Posteriormente se agregó 68 g de zeolita. En el caso de la solución de yodo se mantuvo en un vaso precipitado cubierto, para evitar con ello la exposición a la luz y el deterioro de la solución. Se dejó en reposo durante un periodo de 24 horas a temperatura ambiente.
- 3) La zeolita ya activada se decantó y se lavó con un litro de agua destilada tibia y posteriormente con un litro de agua destilada fría.
- 4) Se secó en un horno durante 24 horas a una temperatura de 100 °C.
- 5) Se almacenó en recipientes herméticos para su posterior utilización.

2.5.2 Activación de Zeolita con Cloro

- 1) Preparación de la solución de cloro: en 500 ml de agua destilada se agregó hipoclorito de sodio granular hasta su saturación.
- 2) A continuación se repiten los pasos 2 al 5 descritos en la activación del yodo.

2.5.3 Activación de Zeolita con Plata

- 1) Preparación de la solución de plata: en 500 ml de agua destilada se agregó 40 g de nitrato de plata (AgNO_3).
- 2) A continuación se repiten los pasos 2 al 5 descritos en la activación del yodo.

El criterio para evaluar la eficiencia de cada uno de los procesos de activación está en función de la eliminación de microorganismos del grupo coliforme. Este grupo coliforme incluye todas las bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas, Gram-negativas no esporuladas en forma de bacilos que fermentan la lactosa con producción de gas en 48 horas a 35 °C. La prueba para Coliformes se llevó a cabo con la técnica de tubos de fermentación múltiple, cuyos resultados de las réplicas y diluciones son reportadas en término del número más probable (NMP) de organismos presentes. Este número está basado en ciertas fórmulas de probabilidad y proporcionan una estimación de la densidad de coliformes en la muestra. La prueba comprende dos etapas, una presuntiva en donde se supone la presencia de bacterias coliformes totales y fecales, y una confirmativa que, dependiendo del medio y la temperatura de incubación utilizada, se corrobora la presencia de bacterias coliformes totales y fecales. Las bacterias coliformes fecales se definen como aquellas que tienen la habilidad para fermentar la lactosa en medio EC (*Escherichia coli*) con producción de gas en 24 horas a 44.5 ± 0.2 °C, es una metodología práctica para diferenciar los coliformes de origen fecal de las fuentes de origen no fecal, el cual, además de lactosa contiene sales de verde billis brillante que inhiben el crecimiento de nuevos organismos formadores de esporas. Esta prueba es usada como un procedimiento de confirmación del cultivo de coliformes obtenidos de la prueba presuntiva. [4]

El agua desinfectada se comparó con la NOM-127-SSA1-1994, las cuales manifiestan los límites máximos permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización de agua para uso y consumo humano que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

2.6.- Adsorción de Plata en la Zeolita

Una muestra predeterminada de zeolita se pone en contacto con una solución al 12% de Nitrato de plata (AgNO_3) por un periodo de 72 horas, posteriormente la zeolita se decanta y lava con agua desionizada repetidamente para eliminar cualquier residuo de Nitrato de plata (AgNO_3) que no se haya adsorbido en la superficie de la zeolita. Por último el material se seca en la estufa a 100°C por 24 horas se enfría y se almacena.

2.7.- Fijación y/o Estabilización de la Plata en la Zeolita

La plata coloidal está constituida por pequeñas partículas de plata metálica que, a su vez, están formadas por muchos átomos. Las observaciones del microscopio de las reacciones de cementación muestran que el metal cementado plata coloidal (Ag^0) es depositado en la superficie creciente mientras el metal disuelto es ionizado y entra en la solución. ^[24]

La plata adsorbida sobre la superficie de la zeolita se encuentra como nitrato (es como una sal), además en algunos casos puede ser tóxica, y no es la forma efectiva para utilizarse como agente biocida, por lo que, bajo ciertas condiciones puede liberarse de la superficie de la zeolita y ser transformada a plata elemental en forma de coloides, utilizando el proceso electroquímico de cementación. ^[24]

Para llevar a cabo la reacción de cementación es importante conocer el potencial estándar de oxidación a 25°C , para el $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^-$, con 0.76 volts y para el $\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + 2\text{e}^-$, se necesita una energía de -0.80 volts. Además de que pueden predecirse en base al potencial del electrodo medido por la celda de reacción. Por lo tanto, un conocimiento de la cinética de reacción de cementación y los mecanismos, es esencial para mayor eficiencia y economía del proceso. ^[24] A continuación se mostrarán los procesos de

cementación natural y asistida, utilizando los sistemas de contacto directo e indirecto bajo las mismas condiciones y así poder obtener nanopartículas de plata.

2.7.1.- Cementación Natural

Proceso 1

En un vaso de precipitado de 250 ml con zeolita activada, se introduce un tubo perforado con polvo de zinc al 99.9% y 180 ml de una solución de nitrato de potasio (KNO_3) al 1%. Se deja reposar por 24 horas. (Figura 5)



Figura 5.- Contacto directo del zinc con la zeolita activada en solución de nitrato de potasio.

Proceso 2

En uno de los tanques interconectados según la Figura 6, se introduce zeolita activada con nitrato de plata (AgNO_3), en el otro tanque se introduce el polvo de zinc al 99.99%. Se agregan 300 ml de nitrato de potasio (KNO_3) al 1% en solución. Se deja reposar por 24 horas. (Figura 7).

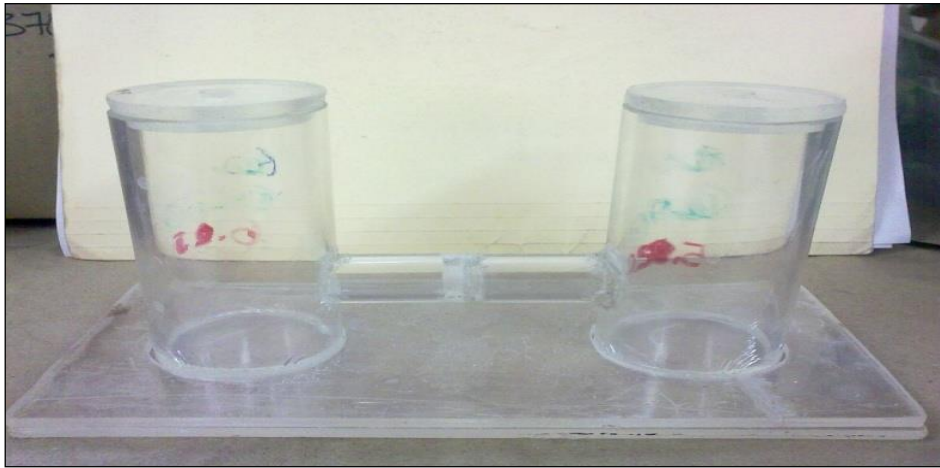


Figura 6.- Prototipo de los Tanques Interconectados



Figura 7.- Proceso separado del zinc y la zeolita activada en solución de nitrato de potasio

2.7.2.- Cementación Asistida

Proceso 3

Al mismo procedimiento descrito en el paso uno, se deja reposar por 24 horas, con un potencial eléctrico de 2 volts. (Figura 8)

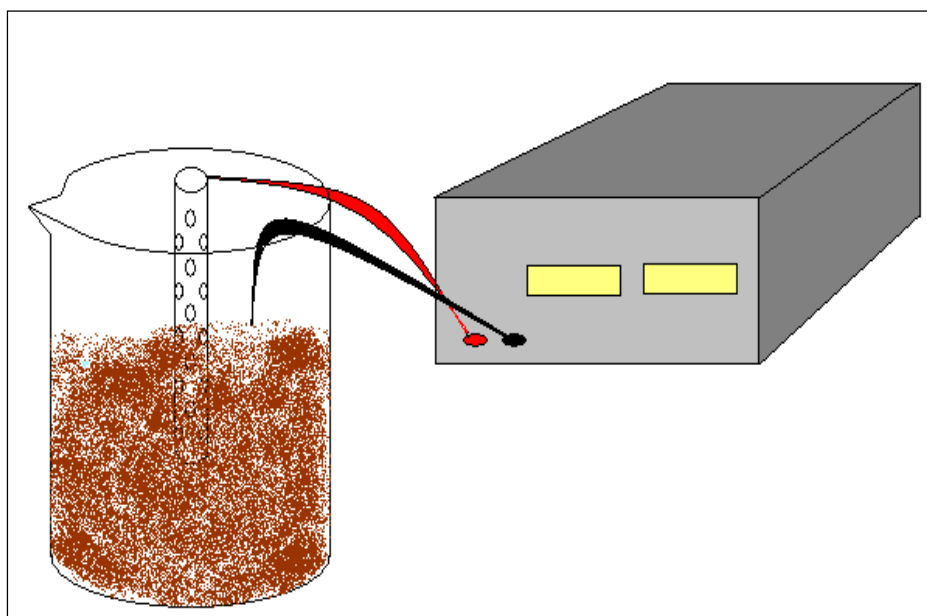


Figura 8.- Contacto directo del zinc con la zeolita activada en solución de nitrato de potasio, con 2 volts de corriente eléctrica.

Proceso 4

Al sistema descrito en el paso dos, se deja reposar por 24 horas, con potencial eléctrico de 2 volts. (Figura 9). Una vez transcurridas las 24 horas de contacto se retira el tubo perforado con el polvo de zinc y la solución de nitrato de potasio. La zeolita activada se lava repetidas veces con agua desionizada y posteriormente se coloca en la estufa de secado por 24 horas a 100 °C. Se retira el vaso de la estufa y se enfría a temperatura ambiente, se almacena en un recipiente hermético para su posterior utilización.

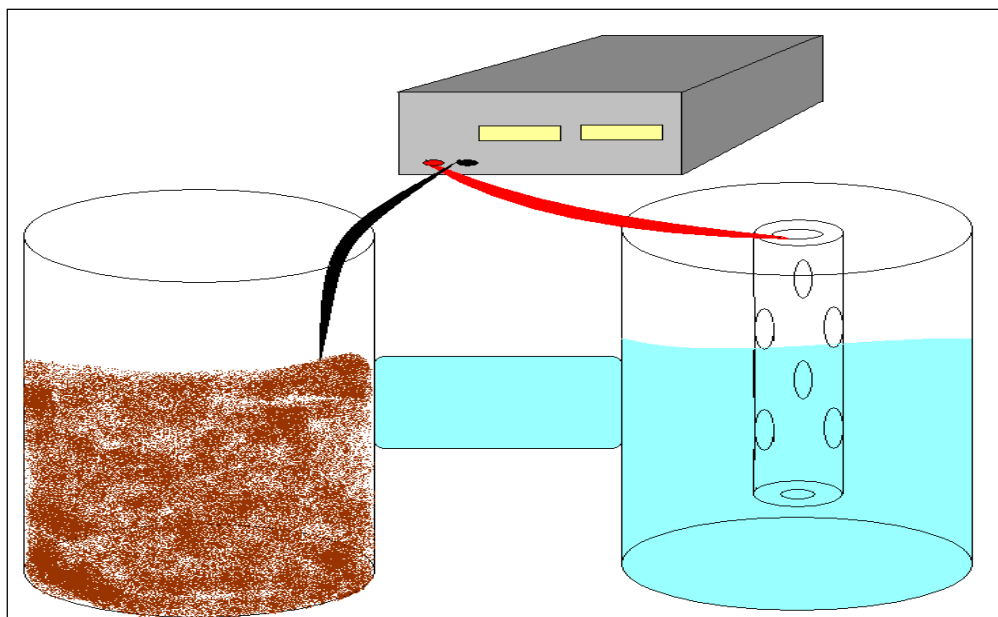


Figura 9.- *Proceso separado del zinc y la zeolita activada en solución de nitrato de potasio y con corriente eléctrica de 2 volts.*

A los cuatro procesos descritos anteriormente, se le realizaron análisis de contenido de plata y zinc, el cual se realizó en un equipo de adsorción atómica del Laboratorio de Servicios Analíticos del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia en la Universidad de Sonora, en base al Manual de Métodos Analíticos para Rocas. ^[10]

2.8.- Análisis Estadístico

Este análisis se realizó mediante el método bi-factorial de Friedman, para aprobar o rechazar las hipótesis de la investigación, las cuales se muestran a continuación con una confiabilidad de 0.95:

Ho: la desinfección del agua del Río San Miguel, la cual determina que la zeolita (Clinoptilolita) activada con plata coloidal elimina los microorganismos en número y tipo que lo clasifiquen, según las normas y genera agua potable.

Ha: la zeolita (Clinoptilñolita) activada con plata coloidal no elimina los microorganismos patógenos presentes en el agua del Río San Miguel.

La función de el análisis de varianza bifactorial por rangos de Friedman requiere de que al menos los datos estén en escala ordinal, por lo que las k muestras son del mismo tamaño y por lo tanto el número de casos N es el mismo en cada una de las muestras. Los datos que emplea esta prueba utilizan rangos, los cuales varían de 1 a k.

Procedimiento:

1. Primeramente se presentan los datos en cada tabla de doble entrada con N renglones (estaciones o muestreos) k columnas (condiciones o variables).
2. Se ordenan por rangos los datos en cada renglón de 1 a K.
3. Se determina la sumatoria de los rangos en cada columna (R_j).
4. Se calcula el valor estadístico de prueba (Fr), según el caso que haya o no empates entre los rangos de cualquier grupo o renglón, con la finalidad de corregir y modificar la distribución muestral.

Ecuación de Friedman (sin empates):

$$Fr = \left[\frac{12}{NK(K+1)} \sum_{j=1}^K R_j^2 - 3N(K+1) \right] \quad (1)$$

Donde: N = Numero de renglones (estaciones o muestreos), K = Numero de columnas (variables o condiciones), R_j = Suma de rangos en la j-ésima columna (suma de los rangos para la variable j-ésima) y Σ= sumatoria de los cuadrados de los rangos de todas las condiciones ecuación de Friedman para empates.

El estadístico de prueba Fr, corregido para modificar la distribución de las muestras.

$$Fr = \frac{12 \sum_{j=1}^K \left[R_j - \frac{n(K+1)}{2} \right]^2}{nK(K+1) - \frac{1}{K+1} \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\sum_{j=1}^{g_i} t_{i*j}^3 \right) - K \right\}} \quad (2)$$

Donde: g_i: Números de conjuntos de rangos empleados en el i-ésimo grupo y t_{i,j}: Tamaño de j-ésimo conjunto de rangos empleados en el i-ésimo grupo.

5. El método para determinar la probabilidad de ocurrencias de un valor observado del estadístico de prueba (F_r), cuando H_0 es verdadera, depende del tamaño de N y de K .
 - a. Las tablas de distribución, proporciona los valores críticos seleccionados de F_r , para N y K pequeñas, cuando $n=2, \dots, 13$; y $K=6$.
 - b. Para los valores mayores de N y K , la probabilidad asociada se determina haciendo referencia a la distribución de χ^2 con grados de libertad $(gl)=K-1$.
6. Si la probabilidad proporcionada por el estadístico de prueba es igual o mayor que el nivel de significancia α , se rechaza H_0 .
7. Si H_0 es rechazada, se realizan las comparaciones múltiples entre grupos o condiciones, para determinar cuáles diferencias entre las condiciones son significativas. ^{[7] [33]}

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Zeolita Clinoptilolita

Se realizó un análisis químico de la zeolita natural (Clinoptilolita) para determinar los elementos. En la Tabla 4, se observó las concentraciones de los elementos afectan a nuestra investigación, por lo que se observó que la composición de la zeolita no se ve afectada en la activación.

Tabla 4. Composición Química de la Clinoptilolita

| Elemento | Símbolo | Concentración en la Clinoptilolita |
|----------|---------|------------------------------------|
| Arsénico | As | n.d |
| Aluminio | Al | 6.90% w/w |
| Calcio | Ca | 3.21% w/w |
| Potasio | K | 2.24% w/w |
| Sodio | Na | 1.71% w/w |
| Silicio | Si | 27.04% w/w |
| Zinc | Zn | 47.40 µg/g |

n.d=No detectado

Además, se determinó las características superficiales de la Clinoptilolita, a partir de una muestra de 0.5 g de zeolita donde se utilizaron análisis de adsorción con nitrógeno en un sistema batch a 77.35 °K con 5 secuencias, los resultados se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Determinación de las características superficiales de la Clinoptilolita

| | |
|------------------|------------------------------|
| Área Superficial | 20.8839 m ² /g |
| Volumen | 0.0775094 cm ³ /g |
| Tamaño del poro | 137.9839 Å |

También se realizó un Difractograma de Rayos X (DRX), en la Figura 10 se observa el patrón de difracción notándose que concuerda con la zeolita Clinoptilolita con fórmula general $\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$. También es posible observar pequeños picos que corresponden a la fase de cuarzo. El 90% del mineral es Clinoptilolita, es decir, presenta un alto grado de pureza.

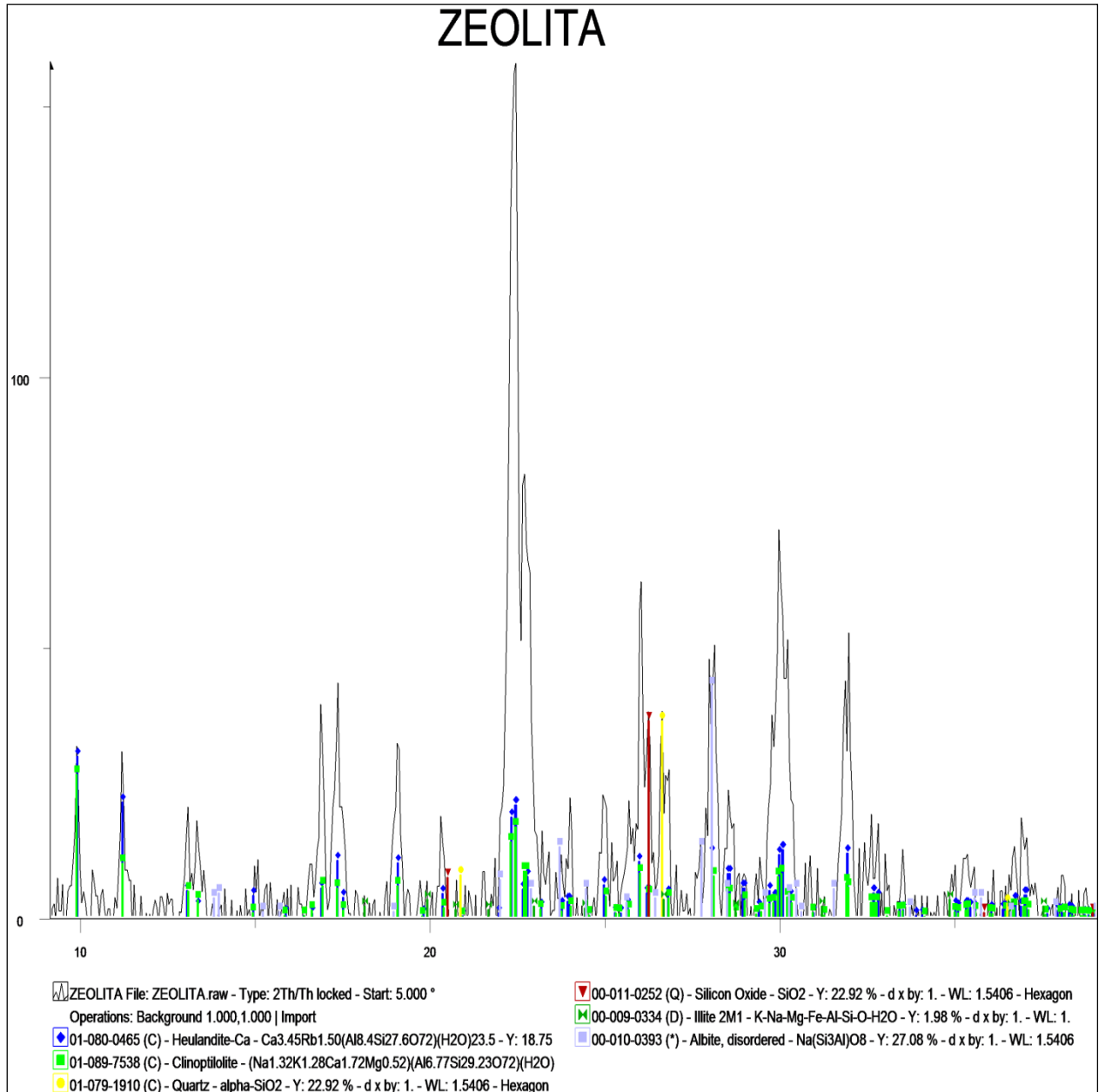


Figura 10.- Difractograma de Rayos X de la Clinoptilolita (Zeolita natural)

Así como un Análisis Termogravimétrico (TGA), En la Figura 11 se observa los resultados de TGA para la Clinoptilolita. Se observaron perdidas de peso en todo el intervalo de temperatura. Éstas ocurrieron de forma gradual obteniéndose una pérdida de peso aproximadamente del 20% en agua al final del experimento, es decir, la zeolita pierde agua físicamente a temperaturas pequeñas y conforme aumenta la temperatura esta no se ve afectada bruscamente, manteniendo su estructura química en un 80%.

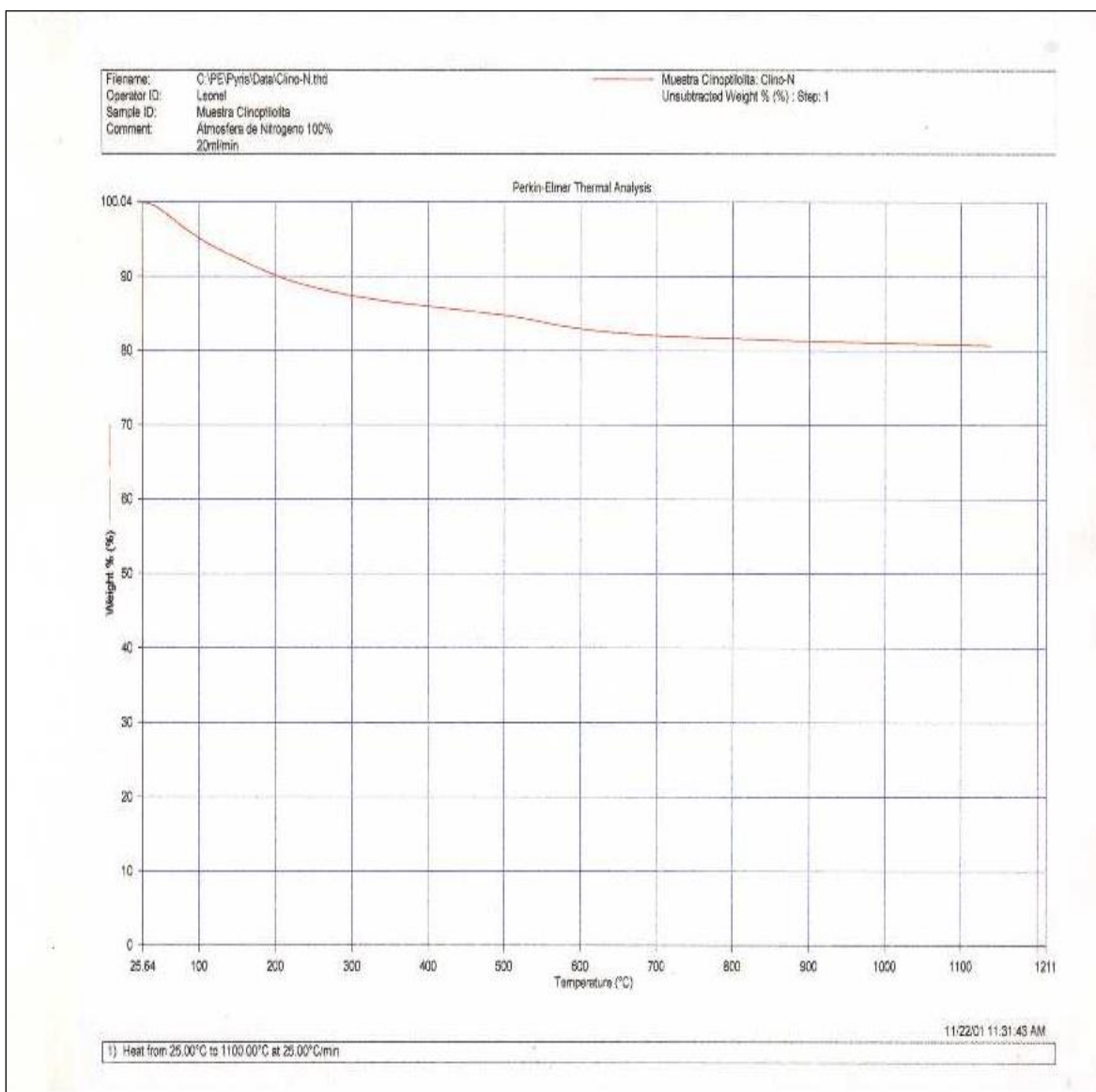


Figura 11.- Análisis Termogravimétrico (TGA) de la Clinoptilolita (zeolita natural).

3.2.- Río San Miguel

Cabe mencionar que en los cuatro muestreos del agua del Río San Miguel, se realizaron en la parte media del río a 3 Km del poblado de San Miguel de Horcasitas, en la cual se observó la presencia de contaminación tanto orgánica como inorgánica, como papel, latería, plásticos, animales muertos, aguas residuales, entre otros.

Para poder determinar la eficiencia del filtro fue necesario analizar las propiedades físico-químicas del agua del Río San Miguel, los cuales se muestran en la Tabla 6, donde se observa que el agua del río se encuentra dentro de los valores máximos permisibles establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua ^[7], publicados en el Diario Oficial de la Federación el 2 de diciembre de 1989, ^[36] los cuales determinan las concentraciones de las propiedades físicoquímicas. En la Tabla 7 se observa que el agua no cumple con la parte microbiológica de los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua ^[7].

Tabla 6. Características Físico-químicas del agua del Río San Miguel

| Propiedades | Río San Miguel | Valores Permitidos |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|
| Acidez (ppm CaCO ₃) | 42 | n.d |
| Alcalinidad (ppm CaCO ₃) | 240 | 400 |
| Cloruros (ppm Cl) | 78.4 | 250 |
| Dureza (ppm CaCO ₃) | 267.57 | 300 |
| Sulfatos (ppm SO ₄) | 53.41 | 500 |
| Calcio (ppm) | 83.41 | 200 |
| Magnesio (ppm) | 14.45 | 125 |
| Manganeso (ppm) | 0.1 | 0.1 |
| Potasio (ppm) | 1.96 | n.d |
| Cobre (ppm) | 0.28 | 1 |
| Hierro (ppm) | 0.19 | 0.3 |
| Sodio (ppm) | 50.2 | 250 |
| Conductividad (µs/cm) | 5.22 | 1200 |
| pH | 7.52 | 5-9 |

n.d=No disponible

Tabla 7. Resultados Microbiológicos del agua del Río San Miguel

| Muestra Número | Coliformes Totales NMP/cm ³ | Coliformes Fecales NMP/cm ³ | Escherichia Coli Presencia | Streptococo Fecal Presencia | Mesófilos <200 UFC/ml | Excede Normas |
|-------------------|---|---|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|
| 1 | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | SI |
| 2 | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | SI |
| 3 | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | SI |
| 4 | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | SI |

Nota: Excede los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, Publicados en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Diciembre de 1989.

3.3.- Filtro a partir de Zeolita

En la Figura 12, se muestra el prototipo del filtro utilizado para la desinfección del agua del Río San Miguel, donde se observa la composición física del filtro a partir de los 8 cm de zeolita activada y 2 cm de arena por cada extremo del cilindro, así como en la Figura 13 se muestra el prototipo para la desinfección del agua.

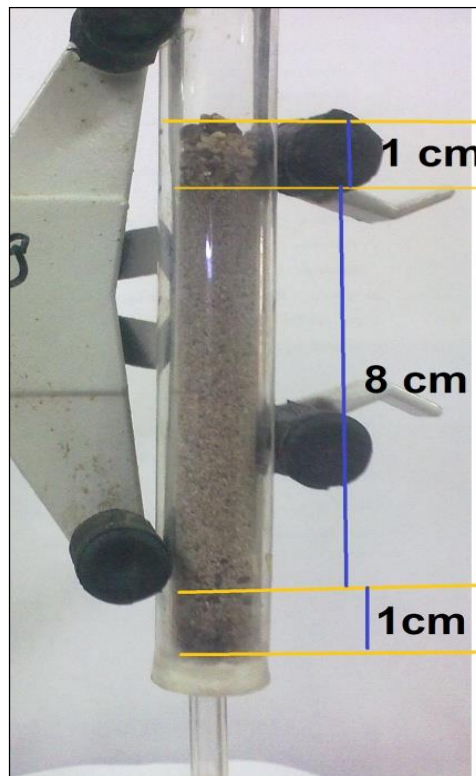


Figura 12.- Prototipo del Filtro para la Desinfección de agua del Río San Miguel



Figura 13.- Prototipo para la desinfección de agua por medio del filtro.

Análisis Microbiológicos: Como es de esperarse el agua del Río San Miguel presenta una gran variedad y cantidad de microorganismos, como por ejemplo, mesófilos aeróbicos, bacterias del grupo coliforme, así como diversos patógenos como Escherichia Coli principalmente. Lo anterior se debe a la sustancia a desinfectar, ya que tiene contacto con pueblos, ejidos y/o municipios cercanos a este, además de animales, lo cual favorece la presencia de un amplio grupo de microorganismos, mucho mayor de la que presentan normalmente.

Los resultados obtenidos en el control de calidad interno llevado a cabo en el análisis microbiológico fueron aceptables para todos los indicadores de calidad sanitaria y para los controles de laboratorio considerados. En la Tabla 8, se presentan los resultados

así como la respuesta de las cepas utilizadas tanto en el aseguramiento de la calidad de los medios de cultivo, como en los testigos y blancos utilizados durante el análisis.

Tabla 8.- Resultados de Blancos utilizados en el control de calidad para Microbiología

| Número Muestreo | Testigo gas (+) E. Coli** | Testigo gas (-) E. aerógenes* | Blanco Reactivo | Blanco Muestra |
|-----------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable |
| 2 | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable |
| 3 | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable |
| 4 | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable |

Nota: E. Coli* representa aceptable la producción de gas, mientras que para E. aerógenes* representa aceptable la no producción de gas.

Los análisis microbiológicos fueron aplicados a muestras de agua del Río San Miguel y agua desinfectada, como se muestra en la matriz de muestreo de la Tabla 9, en la cual especifica el número de análisis realizados durante la investigación.

Tabla 9.- Matriz de Muestreo

| Muestreo | | Agua Superficial | Agua Desinfectada |
|----------|----------------|------------------|-------------------|
| No. | Nombre | Microbiología | Microbiología |
| 1 | Río San Miguel | X/5 | |
| 2 | Cloro (Cl) | | X/1 |
| 3 | Iodo (I) | | X/1 |
| 4 | Plata (Ag) | | X/6 |

En la Tabla 10 se observa que la plata es el método más adecuado para la desinfección del agua en el Río San Miguel, ya que los resultados microbiológicos muestran la eficiencia por encima de la activación del yodo y cloro, donde se puede observar claramente cero NMP/100ml de coliformes totales y fecales, así como ausencia de bacterias del tipo Escherichia Coli y Estreptococo Fecal; además de eliminar en su totalidad los mesófilos presentes. Se puede observar que el yodo y el cloro son desinfectantes buenos en concentraciones altas en comparación con la plata para los

coliformes totales, sin embargo las concentraciones utilizadas en este proceso no son suficientes para la desinfección y por lo tanto exceden la norma NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 10.- Comportamiento Microbiológico según el tipo de activación en la zeolita

| Zeolita | Coliformes Totales | Coliformes Fecales | Escherichia Coli | Estreptococo Fecal | Mesófilos | Excede |
|----------|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|-------------|--------|
| Activada | ≤2NMP/cm ³ | cero NMP/cm ³ | Presencia | Presencia | <200 UFC/ml | Normas |
| Cloro | 1100 | 150 | Presencia | Presencia | >200 | Si |
| Iodo | 1100 | 1100 | Presencia | Presencia | >200 | Si |
| Plata | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |

Nota: Excede la NOM-127-SSA1-1994, especificados en el apéndice C.

Por lo anterior, se establece que la plata es el método de activación conveniente, debido a la eliminación completa de microorganismos. Una vez establecido el método de desinfección (plata), se procedió a evaluar algunas técnicas de estabilización a partir de cuatro procesos de cementación descritos anteriormente, a los cuales se le determinó el contenido de plata y zinc (Tabla 11), además se le realizaron análisis microbiológicos, los cuales se muestran en la Tabla 12.

Tabla 11.- Contenido de Plata y Zinc en la zeolita activada

| Procesos | Lectura de | Lectura de |
|----------|------------|------------|
| Número | Ag (µg/L) | Zn (µg/L) |
| 1 | 80 | 1560 |
| 2 | 214 | 1480 |
| 3 | 212 | 1080 |
| 4 | 168 | 920 |

Tabla 12.- Análisis Microbiológicos para los diferentes Procesos de Activación de la Zeolita con Plata

| Proceso Numero | Coliformes Totales NMP/cm ³ | Coliformes Fecales NMP/cm ³ | Escherichia Coli Presencia | Estreptococo Fecal Presencia | Mesófilos <200 UFC/ml | Excede Normas |
|-------------------|---|---|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|
| *ARSM | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | Sí |
| 1 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 2 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 3 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 4 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |

*ARSM: Agua del Río San Miguel

Con los resultados obtenidos en las Tablas 11 y 12 se observa que cualquiera de las concentraciones presentes de plata y zinc, son aceptables para nuestro sistema, ya que el sistema de análisis microbiológicos muestra una eficiencia en la eliminación total de microorganismos patógenos que satisfacen las normas de calidad. Por tal motivo se escogió que el proceso 3 es el más apropiado para la desinfección del Río San Miguel, debido a las concentraciones de plata coloidal adsorbida (212 mg/ml), y de zinc (1080 mg/ml) en la zeolita más bajas con respecto a los procesos 1 y 4, otro de la ventaja radica en el manejo y complejidad del reactor utilizado.

Adicionalmente se realizaron pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido, para la zeolita natural antes de empezar de la activación, donde se observa que la zeolita al natural, posee una estructura física y color uniforme, ya que el procedimiento se realizó varias veces en diferentes puntos de la muestra a 50 nm, Figura 14. Continuando con el análisis se le realizaron pruebas a la zeolita activada con nitrato de plata, donde se observó la zeolita adsorbida en forma de láminas negras sobre la pared del mineral 50 nm, Figura 15. Además se le realizó un MEB donde se demuestra la adsorción de plata coloidal en la zeolita para el proceso seleccionado (3), donde se observa la presencia de

nanopartículas de plata de forma esférica tanto en la superficie de la zeolita, así como en el interior de los poros del mineral (Figura 16) y diseminadas en el solvente utilizado, debido a la alta concentración de plata coloidal en la superficie (Figura 17).



Figura 14.-Microscopía de Electrónica Barrido de la Zeolita Clinoptilolita

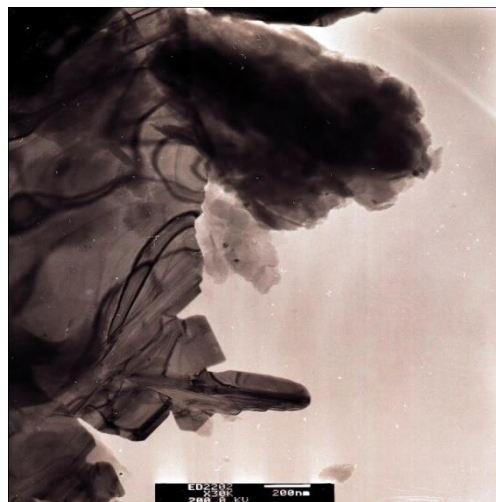


Figura 15.- Microscopía de Electrónica Barrido de la Zeolita activada con nitrato de plata.



Figura 16.- Microscopía de *Electrónica Barrido* de la zeolita con plata coloidal en el interior del mineral.

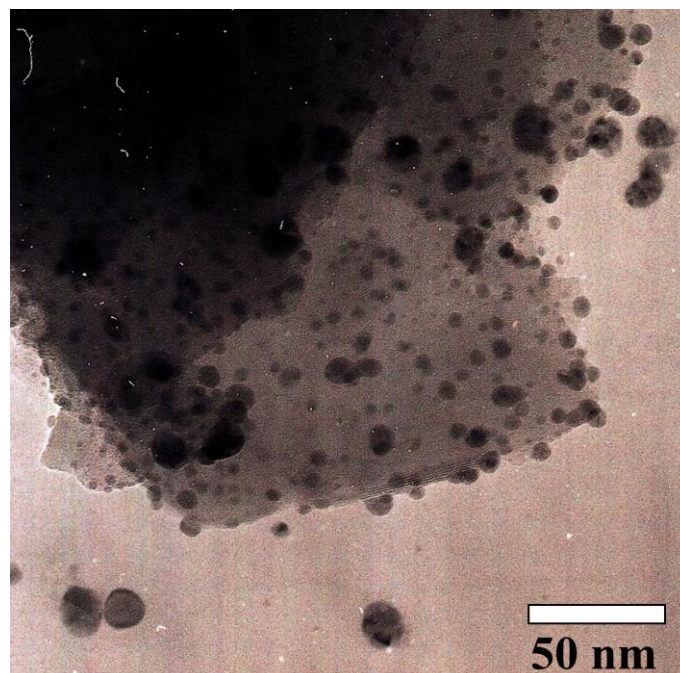


Figura 17.- Microscopía de *Electrónica Barrido* de la zeolita con plata coloidal en la pared del mineral.

Al analizar los resultados de la Tabla 12 y la Figura 17, se determinó que el proceso 3 es el más conveniente, ya que el tamaño de las partículas y concentración, es muy alta, continuando con los análisis se procedió a realizar cuatro muestreos bajo las mismas condiciones, y así poder obtener resultados de la eficiencia del filtro. Como era de esperarse la concentración de microorganismos es muy elevada, y la eficiencia del filtro es aceptable como se muestra en la Tabla 13, en la cual se pueden observar los resultados obtenidos por los diferentes tipos de pruebas microbiológicas realizadas durante los cuatro muestreos realizados, prevaleciendo concentraciones de cero NMP/cm³ de coliformes tanto totales como fecales.

Tabla 13.- Resultados Microbiológicos del Agua Desinfectada

| Muestreo Numero | Coliformes Totales NMP/cm ³ | Coliformes Fecales NMP/cm ³ | Escherichia Coli Presencia | Estreptococo Fecal Presencia | Mesófilos <200 UFC/ml | Excede Normas |
|--------------------|---|---|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|
| *ARSM | >2400 | >2400 | Presencia | Presencia | >500 | Sí |
| 1 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 2 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 3 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |
| 4 | 0 | 0 | Ausencia | Ausencia | 0 | No |

*ARSM: Agua del Río San Miguel

Nota: Excede la NOM-127-SSA1-1994, especificados en el apéndice C.

El integrar el análisis de Estreptococo Fecal a la evaluación de calidad de una investigación, esta proporciona una mayor herramienta para calificar su calidad, ya que este microorganismo es evidencia de contaminación fecal y está abierto a la mayoría de los patógenos. ^[32]

En estos resultados se destaca la eliminación de microorganismos patógenos, como materia fecal y de Escherichia Coli, y con esto una disminución de enfermedades gastroenteritis agudas y diarreas principalmente. Por otra parte el carbón activado

adsorbe olores putrefactos originados principalmente por reacciones metabólicas que son aceleradas por la temperatura (11-33.5°C) que es propicia para el desarrollo de microorganismos, como por los diferentes tipos de contaminantes presentes [3]

En la Figura 18, se muestra el comportamiento de la desinfección de 20 litros de agua del Ríos San Miguel de manera continua con respecto al tiempo para el proceso 3, del cual se tomaron muestras cada 100 ml hasta 20 litros, y así observar el tiempo de vida del filtro y comprobar su eficiencia en la eliminación total de los coliformes totales y fecales.

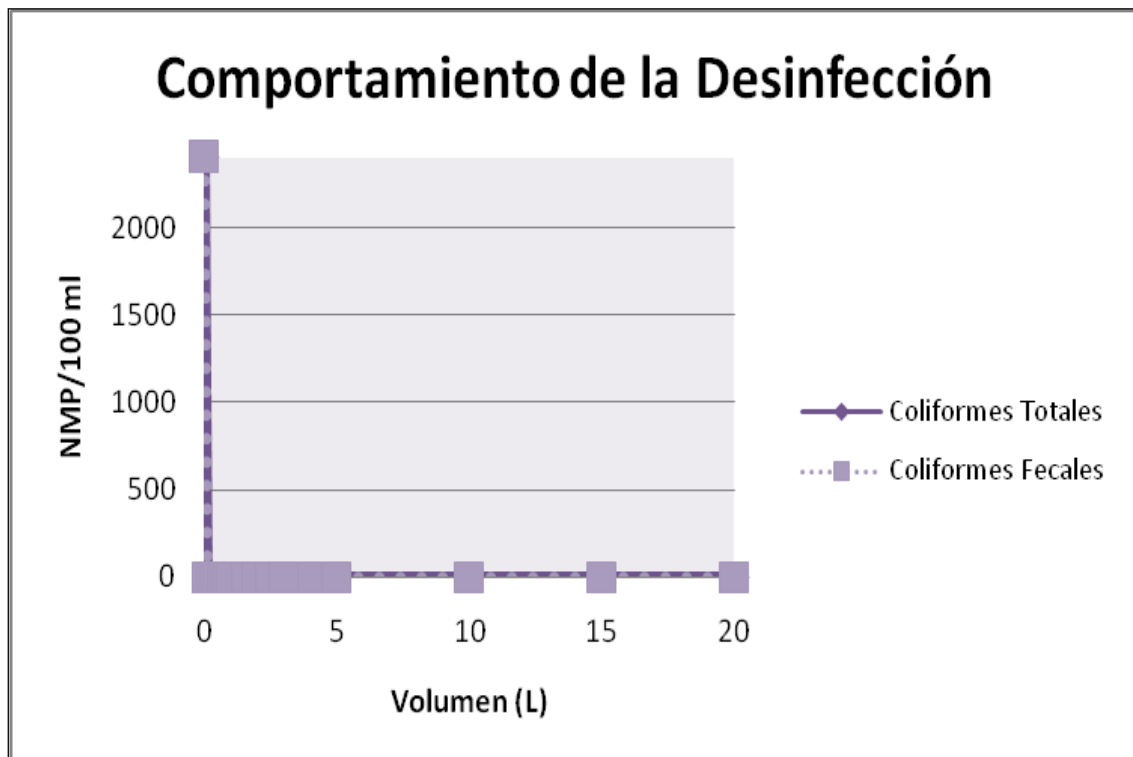


Figura 18.- Comportamiento de la Desinfección del agua del Río San Miguel (Q=50 ml/min)

Estadísticamente no se detectó diferencia significativa de la presencia de estos microorganismos entre los tiempos de muestreos realizados, observando el mismo comportamiento, según el análisis de varianza bi-factorial de Friedman, con $\alpha=0.95$ de

confiabilidad. En la Tabla 14, se observan los valores del estadístico de prueba calculados (Fr), así como los valores en tablas de X_i^2 para aceptar H_0 , en la desinfección del agua del Río San Miguel, la cual determina que la zeolita (Clinoptilolita) activada con plata coloidal elimina los microorganismos en número y tipo que lo clasifiquen, según las normas y genera agua potable.

Tabla 14.- Probabilidades de Ocurrencia de los Valores de Estadístico de Prueba Fr, para la Desinfección del Agua del Río San Miguel

| Parámetro a Evaluar | Valor del Estadístico Fr | Valor de X_i^2 |
|---------------------|--------------------------|------------------|
| Coliformes Totales | 0 | 7.82 |
| Coliformes Fecales | 0 | 7.82 |

Nota: Si $Fr > X_i^2$ se rechaza H_0 , pero si $Fr < X_i^2$ se acepta H_0 .

Comparando los resultados para el agua desinfectada del agua del Río San Miguel se demostró que se encuentra dentro de la Norma Oficial seleccionada (NOM-127-SSA1-1994), la cual especifica concentraciones menores a 2 NMP/100ml de coliformes totales y cero UFC/100ml para fecales, por lo que este proceso es aceptable para aplicarlo como tratamiento de potabilización que puede ser utilizada por la población.

CONCLUSIONES

1. Los análisis microbiológicos del agua del Río San Miguel exceden los Criterios Ecológicos de Control de Calidad del Agua, publicados en el Diario de la Federación, específicamente para coliformes, coliformes fecales etc.
2. Las propiedades físico-químicas del agua del Río San Miguel, no exceden los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, publicados en el Diario de la Federación.
3. La zeolita activada con Yodo y Cloro no cumplen con la desinfección de agua deseada, ya que exceden la NOM-127-SSA1-1994.
4. La zeolita activada con nitrato de plata no excede la NOM-127-SSA1-1994.
5. Los procesos de cementación natural y asistida, para la activación de zeolita con plata coloidal, son eficaces en la desinfección de agua a partir del filtro, la cual se encuentra dentro de la NOM-127-SSA1-1994.
6. Se construyó un filtro con zeolita natural *Clinoptilolita*, con cantidades de plata coloidal pequeñas de aproximadamente 212 µg/L.
7. El comportamiento temporal de los muestreos realizados del agua antes y después del tratamiento se mantuvo constante microbiológicamente, según el análisis bifactorial de Friedman.
8. Se acepta la hipótesis planteada, la cual establece que la desinfección del agua colectada en el Río San Miguel (Poblado San Miguel de Horcasitas), utilizando zeolita (*Clinoptilolita*) activada con plata coloidal elimina los microorganismos en número y tipo que lo clasifiquen, según las normas, obteniéndose agua potable.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con el estudio del análisis microbiológico a otras concentraciones de nanopartículas de plata.
2. Trabajar con diferentes cantidades de zeolita activada con plata y observar la eficiencia en otras escalas.
3. Determinar datos ingenieriles como el modelo matemático del filtro, cinética de adsorción, tiempo de residencia optimo, isotermas de adsorción, entre otros datos.
4. Caracterizar la adsorción de nanopartículas de plata en la zeolita.
5. Determinar la eficiencia del filtro con otras cantidades de carga microbiana.
6. Realizar estudios microbiológicos relacionados con la presencia de otros microorganismos patógenos como salmonella spp, listeria, monocytogenes, vidrio cholera, staphylococcus, entre otros, para probar la eficiencia del filtro.
7. Trabajar en la búsqueda de la desinfección de aguas residuales para hacer eficiente la reducción de carga microbiana que en forma natural presentan este tipo de aguas, de una manera económica y segura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ábrego, P., 2000, Rocas y Minerales industriales de Iberoamérica, Editorial Instituto Tecnológico Geominero de España, pág. 50, 273-300.
2. Bosch, P., Schifter, I., 1988, La zeolita una piedra que hierve, Editorial la Ciencia, S. A. DE C. V., México, págs. 5-100.
3. Branco, M. S., 1984, Limnología Sanitaria. Estudio de la polución de Aguas continentales, Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C., 120 págs.
4. Braude, I.A., 1982, Microbiología, Editorial W. B. Saunders Company, España, págs. 340-343.
5. CNA (Comisión Nacional del Agua), 1993, Manual de Aseguramiento de Calidad, Subdirección General de Administración, Programa de Aseguramiento de la Calidad, México, D.F., 146 págs.
6. CNA (Comisión Nacional del Agua), 1995, Manual de Métodos de Análisis, Subdirección General Técnica, Subgerencia de Laboratorios y Monitoreo, México, D.F., 146 págs.
7. Douglas C. M., 1991, Diseño y Análisis de Experimentos, Editorial Iberoamérica, Belmont, California, Págs. 45-85.
8. Font, M. A., 1960, Atlas de mineralogía, Editorial Jovar, Barcelona, págs. B-1.
9. Gispert, C., 1999, Mineralogía, Editorial Océano, Barcelona, Págs. 89, 31.
10. Gómez Álvarez, A., 2004, Manual de Métodos Analíticos para Rocas y Minerales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, pág. 132-140.
11. González, S. J., Morales, M. M., 1993, Ocurrencia de Zeolitas lacustre en Sonora, México, Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, UNISON 10(2).

12. Guerrero, R. T., 2001, Manual de tratamiento de aguas, Editorial Limusa, México, pág. 117-128, 146.
13. <http://mu.muniguate.com/index.empagua>, 2009.
14. <http://www.cepis.ops-oms.org/es>, 2002.
15. <http://www.laboratorios-argenol.com/qesplatac.htm>, 1993.
16. <http://www.monografias.com/trabajos32/derecho-al-agua/derecho-al-agual>, 2003.
17. <http://www.quimica.es/enciclopedia/es/Plata>, 2009.
18. <http://zeolitas.gl.fcen.uba.ar/historia.htm>, 1985.
19. Jimeno, L., 2006, La plata coloidal aniquila más de 650 especies de microbios patógenos en minutos, Editorial MK3 S.L., Madrid, España, Número de revista 112, www.dsalud.com.
20. Klein, C., et al., 1997, Manual de mineralogía: Basado en la obra de J. Dana, Editorial: Reverté S. A. de C. V., Madrid, España, pág. 396-610.
21. Kogel, J., Barker, J., Trivedi, N., Krukowski, S., 2006, Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses, Editorial Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC., Littleton, Colorado, USA., 7ma Edition, pág. 1039-1065.
22. Koski, T., et al., 1966, Comparison of chlorine, bromine, iodine as disinfectants for swimming pool water, *Applied Microbiology*, Vol. 14, n°2, PMID 4959984, 10 págs.
23. Letterman, R. D., 2002, Calidad y Tratamiento de Agua, Editorial McGraw Hill, Madrid, Quinta edición, pág. 918-1000.
24. Mackinnon, D., et al., Unit Processes in Extractive Metallurgy-Electrometallurgy, Montana, College of Mineral Science and Technology, pág. 4.6.1 - 4.6.21.
25. NMX-AA-42-1987, Norma Oficial Mexicana, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, <http://smn.cna.gob.mx>.
26. NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, <http://smn.cna.gob.mx>.

27. Noriega, J. I., 2003, Ciencias de la naturaleza, Editorial Limusa, México 100 págs.
28. Olgúin, M. T., 1998, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Dpto. de Química, México, D.F., A. P. pág. 18-1027.
29. Pelczar, M., Krieg, Chan, 1989, Microbiología, Editorial Mc Graw Hill, México, D.F., Cap. 39, págs. 532, 681-690.
30. Romero, J. R., 1999, Calidad del agua, segunda edición, Editorial Alfa Omega, México, pág. 195-216.
31. Sánchez, N. T., 1997, Alternativas de desinfección del agua, Unidad de Análisis y Tendencias en Salud, Cuba, vol. 2 No. 5, ISSN 1028-4338, Ministerio de Salud.
32. S.E.D.U.E., Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, 1989, Acuerdo que establecen los Criterios Ecológicos de la Calidad de Agua CE-CCA-001/89, Publicados en el diario Oficial de la Federación del 2 de Diciembre de 1989, México, D.F.
33. Siegel, S., Castellan, N., 1995, Estadística No Paramétrica Aplicada, Editorial Trillas, México, D.F., pág. 207-216.

Apéndice A

Procedimiento de Muestreo ^[25]

Recipientes de muestreo: Los recipientes de muestra utilizados fueron de plástico y de vidrio, adecuados para el manejo durante el trabajo de campo y durante el transporte de las muestras de laboratorio. Este material fue limpiado perfectamente y esterilizado, en los casos necesarios para, para evitar la contaminación de las muestras.

Limpieza de los equipos de muestreos: Todos los equipos (utilizados en el muestreo) que tienen contacto con una muestra de calidad de agua fueron limpiados cuidadosamente antes de llevar a cabo el muestreo.

De igual manera el material utilizado para guardar las muestras de agua (recipientes de plástico y vidrio) y sedimento, se sometió a un control estricto para evitar una posible contaminación. Para esto, el material de muestra y la cristalería se sometió a un remojo en ácido nítrico diluido (6N) durante 3 días; posteriormente se enjuagó con agua común y después deionizada, se secó y se esterilizó (el necesario) para guardarse en bolsas de plástico para su posterior utilización.

Así mismo, el equipo de campo (potenciómetro, termómetro) se calibró de acuerdo a las indicaciones de los fabricantes. El equipo se calibró en cada muestreo contemplado en el Río San Miguel.

Recipientes para muestras microbiológicas: Se utilizaron recipientes de vidrio de boca ancha con tapón de rosca con capacidad de 20 litros. El agua se colectó en la parte media central a contracorriente del río, utilizando recipientes de vidrio limpios previamente, introduciendo el frasco en la corriente de agua destapándola en el interior, tomando en el mismo momento la muestra. Los frascos se llenaron hasta las dos terceras partes del recipiente con la finalidad de poder homogenizar al momento de llevar a cabo el análisis. Una vez tomada la muestra, se protegió el recipiente con una bolsa de plástico limpia para evitar contaminación posterior.

Etiquetado de las muestras colectadas: Todas las muestras colectadas fueron etiquetadas, con tinta indeleble y se fijaron a un lado del envase.

Manejo y transporte de la muestra: Se conservaron a temperatura de 4°C inmediatamente después de su colecta. En relación con las muestras microbiológicas, estas se deben procesar antes de las 8 horas de su colecta.

Apéndice B

Control de calidad de la microbiología ^[25]

Para el análisis microbiológico se utilizaron indicadores de calidad sanitaria y controles de equipo de laboratorio:

Limpieza de equipo: Toda la vidriería incluyendo los recipientes de muestreo se lavó manualmente, eliminando con múltiples enjuagues los residuos de detergentes. En cada lote de lavado se efectuó una prueba para comprobar la efectividad de los enjuagues añadiendo ácido clorhídrico por 30 minutos.

La esterilización de los frascos de muestreo y vidriería se llevó a cabo a 121°C durante 15 minutos, usando siempre papel adhesivo indicador.

Aseguramiento de la calidad de los medios de cultivo: Periódicamente, en especial cuando se comienza a usar un lote importante de medio de cultivo, se realizan sembrados en los medios de cultivo con bacterias de referencia; los cuales se presentan en la tabla B-1.

Tabla B-1.- Aseguramiento de la Calidad de los Medios de Cultivo.

| Medio | Temperatura | Testigo Positivo | Testigo Negativo |
|-----------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|
| Lauril Triptosa | 35°C | E. Coli (ATCC 11229) | Enterobacter Aerógenes (ATCC 13048) |
| Caldo Lactosado | 35°C | E. Coli (ATCC 11229) | Enterobacter Aerógenes (ATCC 13048) |
| Medio EC | 44.5°C | E. Coli (ATCC 11229) | Enterobacter Aerógenes (ATCC 13048) |

Nota: La ATCC garantiza la viabilidad, pureza e identificación exacta de los microorganismos comerciales.

Control del área de siembra: Para el control del cuarto de siembra, una vez limpiado pisos y paredes y sanitizadas las mesas de trabajo y manteniendo las luces ultravioletas por 24 horas, se dejó una caja de petri conteniendo agar Plate Count abierta por 15 min, posteriormente se incubó 48 horas a 35°C. Si se detectaban una cantidad de colonias superior a 30 o crecimiento de hongos, se efectuaba una limpieza detallada del cuarto.

Control de equipo de laboratorio: Para tener precisión y exactitud de los resultados obtenidos, se siguieron controles de temperatura y de limpieza de todo el equipo de laboratorio.

Control de reactivos y medios de cultivos: Por medio de un registro de medios de cultivo, registrado la fecha de compra, número de lote, fecha de preparación y fecha de caducidad.

Control durante el análisis: Al efectuarse el análisis, se utilizó un blanco reactivo, blanco muestra, testigo positivo y testigo negativo como control.

Blanco reactivo: es un tubo de ensaye o caja petri, conteniendo el medio que se esté usando para el análisis respectivo, el cual se mantiene cerrado para evaluar la esterilidad del mismo.

Blanco muestra: en un tubo de ensaye o caja petri conteniendo el medio que se esté usando para el análisis respectivo, el cual se mantiene abierto durante el análisis con la finalidad de evaluar la esterilidad del medio ambiente del cuarto de siembra. Tanto el blanco reactivo como el blanco muestra se someten a incubación junto con la muestra analizada, si presentan crecimiento, indican contaminación ambiental y/o una deficiente esterilización o mal funcionamiento de la autoclave.

Testigo positivo: es un tubo de ensaye conteniendo el medio que se esté usando para el análisis respectivo, el cual se inocula la cepa de referencia de reacción positiva al medio de cultivo.

Testigo negativo: es el tubo de ensaye conteniendo el medio que se esté usando para el análisis respectivo, el cual se inocula con una cepa de referencia de reacción negativa al medio de cultivo. Tanto el testigo positivo como el negativo se someten a incubación junto con la muestra analizada, si presentan el crecimiento respectivo, indican la efectividad del medio de cultivo para el desarrollo de microorganismos.

Apéndice C

Normas y Criterios de Calidad Mexicanas Utilizadas para la Evaluación de los Resultados

NOM-127-SSA1-1994.- establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Tabla C-1.- Límites máximos permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano ^[26]

| Característica | NOM-127-SSA1-1994 |
|--------------------|---|
| Coliformes Totales | 2 NMP/100ml 2 UFC/100ml |
| Coliformes Fecales | No detectable NMP/100ml cero UFC/100ml |

Nota: Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml).

Tabla C-2.- Criterios Ecológicos de Calidad de Agua para Diferentes Usos

(S.E.D.U.E., 1989) ^[32]

| Parámetro | Fuente de Abastecimiento de Agua Potable | Recreativo e Industrial | Riego Agrícola | Pecuario | Protección de la Vida Acuática de Agua Dulce |
|-----------------------------|--|-------------------------|----------------|----------|--|
| Potencial de Hidrógeno (pH) | 5.0 - 9.0 | 6.0 - 9.0 | 4.5 - 9.0 | | |
| Conductividad Eléctrica | | | | | |
| Sulfatos | 500 | | 130 | 50 | 0.005 |
| Cadmio | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | |
| Cobre | 1 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | |
| Cromo Hexavalente | 0.05 | 0.1 | 1 | 1 | 0.01 |
| Hierro | 0.3 | | 5 | | 1 |
| Manganeso | 0.1 | | | | |
| Niquel | 0.01 | | 0.2 | 1 | |
| Plomo | 0.05 | 0.1 | 5 | 0.1 | |
| Zinc | 5 | | 2 | 50 | |

Nota: La concentración se expresa en mg/l y la conductividad eléctrica se expresa en micromhos/cm, a menos que se especifique otra unidad, publicado en el Diario de Federación del 2 de Diciembre de 1989.