

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y FLÚOR DEL AGUA SUBTERRÁNEA
DE CHIHUAHUA MEDIANTE HIDROGELES DE QUITOSANO
SINTETIZADOS CON RADIACIÓN GAMMA**

POR:

ING. IVÁN PAMILA TECUAUTZIN

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

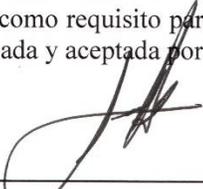
MAESTRO EN INGENIERÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

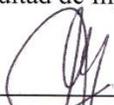
ENERO DE 2019



Remoción de arsénico y flúor del agua subterránea de Chihuahua mediante hidrogeles de quitosano sintetizados con radiación gamma. Tesis presentada por Iván Pamila Tecuautzin como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:



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



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Martha Lorena Calderón Fernández
Coordinador(a) Académico(a)



Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar
Director de Tesis

Enero de 2019

Fecha

Comité:

Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias
Dr. Humberto Silva Hidalgo

© Derechos Reservados

Ing. Iván Pamila Tecuautzin

Monte Wilson #4502, Quintas Carolinas,
31146 Chihuahua, Chihuahua.

Enero de 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

3 de diciembre de 2018

ING. IVÁN PAMILA TECUAUTZIN

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y FLÚOR DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE CHIHUAHUA MEDIANTE HIDROGELES DE QUITOSANO SINTETIZADOS CON RADIACIÓN GAMMA”**.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

- 1.1 Introducción
- 1.2 Justificación
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Hipótesis

CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL ARSÉNICO, FLÚOR Y URANIO: HISTORIA, FUENTES NATURALES, USOS Y APLICACIONES, VÍAS DE EXPOSICIÓN, EFECTOS A LA SALUD, ESTUDIOS PREVIOS EN CHIHUAHUA.

- 2.1 Arsénico
- 2.2 Flúor
- 2.3 Uranio

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN

- 3.1 El proceso de adsorción
- 3.2 Isotermas y cinéticas de adsorción
- 3.3 Hidrogeles de quitosano
- 3.4 Experiencias en remoción de arsénico y flúor del agua en Chihuahua y México.

CAPÍTULO 4. MARCO FÍSICO

- 4.1 Localización de la zona de estudio
- 4.2 Población
- 4.3 Clima
- 4.4 Fisiografía
- 4.5 Hidrografía
- 4.6 Geología
- 4.7 Estratigrafía

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2.
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

- 5.1. Localización y muestreo en pozos seleccionados
- 5.2. Síntesis de hidrogeles de quitosano (net-CS)
- 5.3. Síntesis de gel de quitosano injertado con n-vinilcaprolactama y dimetilacrilamida ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))
- 5.4. Obtención de datos de equilibrio de adsorción (net-CS)
- 5.5. Obtención de datos de equilibrio de adsorción con hidrogel modificado ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))
- 5.6. Obtención de isotermas de adsorción (net-CS)
- 5.7. Calculo de la capacidad de adsorción del hidrogel

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 6.1 Parámetros físicos y composición química del agua subterránea en Chihuahua, Chihuahua, México.
- 6.2 Síntesis del hidrogel de quitosano (net-CS)
- 6.3 Cinéticas de adsorción
- 6.4 Isotermas de adsorción
- 6.5 Caracterización química de los hidrogeles de quitosano por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y análisis elemental

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 7.1 Conclusiones y recomendaciones

BIBLIOGRAFIA

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

ANEXO

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

ATENTAMENTE

"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.C.H.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

DEDICATORIA

A mis padres: Julián Pamela Aguilar y Roberta Tecuautzin Báez por haber creído en mí y por toda la confianza que en mí depositaron para la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre que siempre ha estado conmigo exigiéndome ser cada día mejor. Gracias por apoyarme incondicionalmente en mis estudios, por cuidarme, mostrarme mis errores, enseñarme el valor del trabajo, porque la vida no es fácil. Eres y has sido un ejemplo de vida. Soy el fruto de tus enseñanzas y sacrificios para llegar hasta donde estoy.

A mi madre, el pilar de mi vida, que siempre está dispuesta a escucharme, a apoyarme y a alentarme. Gracias madre por estar ahí cuando te necesito, por tus consejos, por tu crianza y sobre todo por amarme tanto.

A mi novia Ilse Abigail, gracias por estar a mi lado, que con tu valor y entrega has sido una persona incondicional en esta etapa de mi vida. Has sido mi soporte, mi mejor amiga, mi consejera, mi apoyo, mi luz, mi guía, mi felicidad, mi todo para seguir adelante y no bajar los brazos en los momentos más difíciles.

A dios por haberme permitido llegar a este momento de mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me enseñaron a valorarte cada día más, y haberme dado fuerzas y valor para lograr mis objetivos.

Al Dr. Juan Carlos Burillo por su confianza, consejos, sus palabras de aliento, por compartir conmigo sus conocimientos, su tiempo y dedicación. Gracias maestro por todo, pero en especial por brindarme su amistad y confianza, fue un placer y un gran honor para mí tener la oportunidad de ser su alumno y trabajar a su lado.

Al Dr. Alejandro Villalobos Aragón, Dra. Lourdes Ballinas y al Dr. Humberto Silva, por sus valiosos consejos, por su apoyo y por compartir sus conocimientos durante mi formación académica. Gracias por contribuir a la realización de esta investigación.

A el M.C. Ernesto Guerrero encargado del Laboratorio de Difracción de Rayos X del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, por todo el apoyo recibido para la elaboración de esta investigación.

A la I.Q.A. Paula Lozoya encargada del departamento de adsorción atómica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por todo su apoyo recibido en la materialización de este proyecto de investigación.

A la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua por todo el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por el apoyo brindado para desarrollar esta investigación y por haber creído en mí dándome la oportunidad de cursar esta maestría.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue comprobar la eficacia de los hidrogeles de quitosano (net-CS y net-CS-g-NVCL/DAAm) en remoción de arsénico (As) y flúor (F) que se encuentra presentes en el agua subterránea de consumo humano de la ciudad de Chihuahua, además actualizar la información hidrogeoquímica al cuantificar la concentración de estos contaminantes en una serie de pozos distribuidos a lo largo de la ciudad. La zona de estudio abarcó el muestreo de 8 pozos, los cuales cuentan con registros históricos de altos niveles de concentración de As, F y U en agua subterránea, por lo que fueron muestreados y analizados nuevamente, midiéndoles alcalinidad, cloruros (Cl), azufre (S), pH, arsénico (As), flúor (F) y uranio (U). Se encontró que el 75% de los pozos muestreados presentaron valores por encima del límite permisibles de la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994) en concentraciones de arsénico y de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2000) respecto al uranio (65 FR 76708-76753), además se encontró que el 50% de pozos muestreados tenían concentraciones de flúor por encima del límite permisible de la norma mexicana. El pozo seleccionado para las pruebas de adsorción fue el número 4, ya que este pozo mostró los valores promedio más altos en concentración de As, F y U de todos los pozos.

Los hidrogeles de quitosano (net-CS y net-CS-g-NVCL/DAAm) sintetizados en esta investigación se utilizaron como adsorbentes en los distintos lotes formados para las pruebas de adsorción. Se evaluaron cinéticas e isotermas de adsorción para As y F. El hidrogel que mostró mayor eficacia en remoción de contaminantes fue el hidrogel modificado (net-CS-g-NVCL/DAAm) obteniendo un 46 y 14 por ciento de remoción de arsénico y fluoruros, mientras el hidrogel normal (net-CS) presentó un porcentaje de remoción de arsénico y fluoruros del 40 y 1 por ciento, respectivamente. La capacidad de adsorción del hidrogel modificado para As y F fue de 0.022 y 0.150 mg/g, respectivamente alcanzada después de 50 h, mientras que para el hidrogel normal (net-CS) la capacidad de adsorción para As y F fue de 0.0014 y 0.0566 mg/g. Además, se determinó que la isoterma de Freundlich se ajustó mejor al proceso de adsorción lo que indica una adsorción en monocapa y energéticamente heterogénea.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the efficacy of chitosan (net-CS y net-CS-g-NVCL/DAAm) hydrogels to remove arsenic (As) and fluorine (F) ions that are present as contaminants in the groundwater of human consumption in the city of Chihuahua, and to update hydrochemical information by quantifying the concentration of these contaminants in a series of wells distributed throughout the city. The study area covered the sampling of 8 deep wells which had historical records of high levels of concentration of As, F and U in groundwater, so these wells were sampled and analyzed again, quantifying alkalinity, chloride (Cl), sulphur (S), pH, arsenic (As), fluorine (F) and uranium (U). It was found that 75% of the sampled wells showed values above the permissible limit of the official Mexican standard (NOM-127-SSA1-1994) in concentrations of arsenic and above the limit proposed by Environmental Protection Agency (EPA, 2000) with respect to uranium (65 FR 76708-76753); it was also found that 50% of sampled wells had fluoride concentrations above the permissible limit of the Mexican standard. The well selected for adsorption tests was number 4, as this well showed the highest average values in concentrations of As, F and U of all wells.

The hydrogels of chitosan (net-CS y net-CS-g-NVCL/DAAm) synthesized in this research were used as adsorbents in the different batch tests. Kinetics and adsorption isotherms were evaluated for As and F. The hydrogel that showed greater efficacy in removal of contaminants was modified hydrogel (net-CS-g-NVCL/DAAm) obtaining 46 and 14% removal of arsenic and fluoride, while the normal hydrogel (net-CS) presented a percentage of removal of arsenic of 40% and 1% fluoride respectively. The adsorption capacity of hydrogel modified for As and F was 0.022 and 0.0150 mg/g, respectively reached after 50 hours, while the normal (net-CS) hydrogel adsorption capacity for As and F was 0.0014 and 0.0566 mg/g. It was also determined that the Freundlich isotherm was better adjusted to the adsorption process indicating a monolayer adsorption and energetically heterogeneous.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Hipótesis.....	3
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL ARSÉNICO, FLÚOR Y URANIO.....	4
2.1 Arsénico.....	4
2.1.1 Química del arsénico.....	5
2.1.2 Fuentes naturales.....	6
2.1.3 Arsénico en el suelo.....	7
2.1.4 Arsénico en el agua.....	7
2.1.5 Arsénico en el aire.....	8
2.1.6 Usos y aplicaciones.....	9
2.1.7 Vías de exposición.....	9
2.1.8 Efectos en la salud.....	10
2.1.8 Arsénico en Chihuahua.....	12
2.2 Flúor.....	12
2.2.1 Química del flúor.....	13
2.2.2 Fuentes naturales.....	14
2.2.3 Flúor en el suelo.....	14
2.2.4 Flúor en el agua.....	15
2.2.5 Flúor en el aire.....	16



2.2.6 Usos y aplicaciones	16
2.2.7 Vías de exposición	16
2.2.8 Efectos en la salud	17
2.2.9 Flúor en Chihuahua.....	18
2.3 Uranio	18
2.3.1 Química del uranio	19
2.3.2 Fuentes naturales	21
2.3.3 Uranio en el suelo.....	21
2.3.4 Uranio en el agua.....	22
2.3.5 Uranio en el aire	22
2.3.6 Usos y aplicaciones.....	22
2.3.7 Vías de exposición	23
2.3.8 Efectos en la salud	23
2.3.9 Uranio en Chihuahua.....	24
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN.....	25
3.1 El proceso de adsorción.....	25
3.2 Isotermas y cinéticas de adsorción.....	26
3.3 Hidrogeles de quitosano.....	31
3.4 Experiencias en remoción de arsénico y flúor del agua en Chihuahua y México.	32
CAPÍTULO 4. MARCO FÍSICO.....	34
4.1 Localización de la zona de estudio	34
4.2 Población	36
4.3 Clima	37
4.4 Fisiografía.....	38
4.5 Hidrografía	40
4.6 Geología.....	41
4.7 Estratigrafía.....	41
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	45
5.1 Localización y muestreo en pozos seleccionados	45
5.2 Síntesis de hidrogeles de quitosano (net-CS).....	47
5.3 Síntesis de gel de quitosano injertado con n-vinilcaprolactama y dimetilacrilamida ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))	51
5.4 Obtención de datos de equilibrio de adsorción (net-CS).....	52



5.5 Obtención de datos de equilibrio de adsorción con hidrogel modificado ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm)).....	55
5.6 Obtención de isotermas de adsorción (net-CS).....	56
5.7 Calculo de la capacidad de adsorción del hidrogel	58
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
6.1 Parámetros físicos y composición química del agua subterránea en Chihuahua, Chihuahua, México.	59
6.2 Síntesis del hidrogel de quitosano (net-CS).....	61
6.3 Cinéticas de adsorción	62
6.4 Isotermas de adsorción	64
6.5 Caracterización química de los hidrogeles de quitosano por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	65
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
7.1 Conclusiones y recomendaciones	68
BIBLIOGRAFIA	71
PÁGINAS WEB CONSULTADAS.....	80
ANEXO.....	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Queratosis por arsénico en las palmas de las manos por consumo prolongado de agua contaminada con arsénico (ATSR, 2007).	10
Figura 2. Efecto del flúor en los dientes A) Fluorosis dental y B) fluorosis esquelética (Gómez et al., 2002).	17
Figura 3. Ejemplos de las formas en que aparece el uranio en la naturaleza a) Plechblenda, b) Torbenita, c) Monacita y Sabugalita (Artieda, 2018).	19
Figura 4. Esquema general del proceso de adsorción (Levy, 2016)	25
Figura 5. Esquema general de una isoterma de adsorción (Leyva, 2016)	26
Figura 6. Isotermas de adsorción más comunes (Belter et al., 1988).	27
Figura 7. Localización del acuífero Chihuahua – Sacramento (CONAGUA; Arc GIS 10.3).	36
Figura 8. Clasificación climática del acuífero Chihuahua – Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).	38
Figura 9. Provincias Fisiográficas, Acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3). 39	
Figura 10. Mapa de Regiones y Provincias Fisiográficas de México (INEGI 2008).	40
Figura 11. Clasificación Geológica del acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).	43
Figura 12. Estado de Chihuahua. B. Municipio de Chihuahua. C. Mapa de localización de los pozos muestreados (INEGI; Arc GIS 10.3).	46
Figura 13. Toma de muestras de agua subterránea para los pozos seleccionados.	47
Figura 14. Preparación de solución de ácido acético (10% volumen/volumen).	48
Figura 15. Solución de quitosano CS (1% peso/volumen).	49
Figura 16. Lavado de los films de quitosano con solución de Hidróxido de sodio (NaOH), para remover el exceso de ácido acético.	50
Figura 17. Lavado de los films de quitosano con agua destilada.	50
Figura 18. Resultado de la síntesis del Hidrogel de quitosano.	51
Figura 19. Resultado de la síntesis del gel de quitosano modificado.	52
Figura 20. Esquema experimental para las pruebas de adsorción.	54
Figura 21. Esquema experimental para la obtención de cinéticas de adsorción.	56
Figura 22. Esquema experimental para la obtención de isotermas de adsorción.	58
Figura 23. Cinética de adsorción de arsénico empleando net-CS y net-CS-g-NVCL / DAAM.	63
Figura 24. Cinética de adsorción de flúor empleando net-CS y net-CS-g-NVCL / DAAM.	63
Figura 25. A) Ajuste de Freundlich, B) Isoterma corregida con Freundlich.	64
Figura 26. A) Ajuste de Freundlich, B) Isoterma corregida con Freundlich.	65
Figura 27. A) Imagen del hidrogel modificado (net-CS-g-NVCL / DAAM) en el MEB con electrones secundarios y topografía, en distintos enfoques. B) Imagen del hidrogel (net-CS) en el MEB con electrones secundarios y topografía en distintos enfoques.	66
Figura 28. A) Forma y composición química del hidrogel modificado (net-CS-g-NVCL / DAAM) B) Forma y composición química del hidrogel de quitosano (net-CS).	67



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de estudios previos de cuantificación de arsénico en el Estado de Chihuahua.....	12
Tabla 2. Estudios previos de cuantificación de Flúor en el Estado de Chihuahua.	18
Tabla 3. Estudios previos en remoción de arsénico y flúor en agua subterránea en México.	33
Tabla 4. Coordenadas UTM de la poligonal del acuífero Chihuahua-Sacramento.	35
Tabla 5. Clasificación Geológica acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3)....	42
Tabla 6. Identificación de los pozos muestreados	45
Tabla 7. Lista de materiales empleados en las pruebas de adsorción.	53
Tabla 8. Itinerario de muestreo para pruebas de adsorción.	54
Tabla 9. Lista de materiales empleados en las pruebas de adsorción con quitosano modificado.....	55
Tabla 10. Itinerario de muestreo para pruebas de adsorción.	56
Tabla 11. Lista de materiales empleados para la obtención de isotermas de adsorción.	57
Tabla 12. Cálculo de volúmenes en obtención de porcentajes de dilución.....	58
Tabla 13. Resultado de análisis fisicoquímicos de los pozos muestreados (Marzo de 2018). Los valores que superan las normas ambientales aparecen en negritas.	60
Tabla 14. Parámetros de ajuste para las isotermas de adsorción de Freundlich.	65



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

En las zonas áridas, la principal fuente de abastecimiento de agua potable a la población, es el agua subterránea. La calidad del agua es función de las características geológicas, hidrológicas y químicas del acuífero donde el agua es extraída. Así, por ejemplo, el Arsénico (As), Flúor (F) y Uranio (U) en el agua subterránea en México se explica por la presencia de rocas volcánicas y calizas que contienen en su estructura algunos de los siguientes minerales: arsenopirita, fluorita, uraninita, uranofano, entre otros (Alba y Chávez, 1974; Goodell y Waters, 1982, Reyes-Cortés et al, 2010). Son este tipo de minerales los que al disolverse en el agua forman complejos de arsénico, flúor y uranio, capaces de moverse en el agua, y que dependen de la profundidad a la que se encuentre el nivel freático, de las velocidades de agua reportadas en el acuífero, de las zonas de recarga, de las características de la cuenca hidrológica. Ante la presencia de estos contaminantes naturales, el interés actual es encontrar métodos de tratamiento económicos y viables que mejoren la calidad del agua hasta estándares deseables (NOM-127-SSA1-1994). De los sistemas existentes, se han probado precipitación química, intercambio iónico, filtración, ósmosis inversa, tratamientos biológicos, etc. (Areva 2014; Camacho et al., 2011; Alarcón et al., 2011; Piñón et al., 2002) o adsorción en sedimentos del acuífero (Davis et al., 2003). La adsorción de contaminantes mediante hidrogeles de quitosano ofrece las siguientes ventajas: los hidrogeles son biopolímeros inteligentes (adaptables a cambios de pH y temperatura) que se hinchan con el agua y pueden adsorber especies acuosas diversas (Pérez-Calixto et al., 2016). Los hidrogeles son básicamente materia orgánica; se sabe que la materia orgánica, que se encuentra en un pantano o atrapada en un lente arcilloso, genera las condiciones de oxidación-reducción necesarias para adsorber y precipitar sustancias uraníferas en el agua (Angiboust et. a., 2012). Los hidrogeles pueden atrapar cationes y aniones en solución, al contar con sitios activos que producen enlaces iónicos, además son relativamente fáciles de sintetizar y probar en el laboratorio para retener metales pesados (Burillo et. al., 2014). La



concentración de arsénico en agua subterránea potable es por lo común menor a 0.025 mg/L, de flúor menor a 1.5 mg/L (NOM-127-SSA1-1994) y de uranio menor a 0.030 mg/L (EPA 2002), estos valores han sido establecidos para prevenir problemas de salud como daños renales y dentales sobre todo cuando el consumo de agua ha sido por tiempos prolongados o en tiempos breves con concentraciones elevadas. En este sentido, se previene el riesgo a la salud por toxicidad y cáncer. Debido a estas concentraciones y a los volúmenes de agua que suministran los organismos operadores a la población (entes públicos), se espera a futuro tratar el agua sin modificar en general sus características físicas y químicas, por ejemplo, sin modificar drásticamente su pH, temperatura, sólidos disueltos. Estos materiales adsorbentes, en específico el hidrogel de quitosano, un derivado de la quitina material obtenido de la cáscara de camarón, ya han sido probado para tratar agua residual urbana (Yi et al., 2017), agua residual de minas (Burillo et al., 2017) y para remover uranio de agua de mar (Das et al., 2009), pero no ha sido probado directamente para remover arsénico, flúor y uranio del agua subterránea. El pH del agua en estudio controla que ciertas especies acuosas sean más abundantes que otras. Se sabe que a un pH entre 4 y 8, los polímeros adsorben más arseniatos, fluoruros y carbonatos de uranio.

1.2 Justificación

La presencia de los elementos: arsénico, flúor y uranio en el agua subterránea representa una potencial amenaza a la salud humana en el país. Su presencia depende de la concentración de sus iones presentes influenciados por el pH y la temperatura del ambiente.

En México se deben hacer análisis periódicos de los contaminantes más comunes en el agua subterránea, sobre todo cuando dicha agua se empleará para consumo humano.

Los laboratorios deben tener los equipos de medición adecuados para realizar las mediciones de estos contaminantes.

Se deben instalar sistemas de tratamiento en cada sitio donde la presencia de concentraciones de arsénico y flúor superen los valores límites permisibles para consumo.



Las investigaciones sobre nuevas formas económicas de tratamiento del agua deben realizarse en las universidades y centros de investigación y es de esperarse que sean respaldadas por las autoridades locales. Estas investigaciones inician con pruebas de laboratorio.

Algunos autores han observado que estos contaminantes naturales, As, F y U, en ambientes naturales se adsorben fuertemente a los hidróxidos de hierro, los minerales arcillosos y la materia orgánica.

El tratamiento de las aguas subterránea de la ciudad de Chihuahua mediante procesos de adsorción empleando hidrogeles de quitosano, un biopolímero producido de la cáscara de camarón, es una opción novedosa, sustentable y económica que puede ofrecer una alternativa a la demanda de calidad de agua.

1.3 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivos: (1) actualizar la información respecto a la calidad del agua subterránea en la ciudad de Chihuahua respecto a los parámetros de arsénico, flúor y uranio y algunos parámetros fisicoquímicos, y (2) remover contaminantes naturales del agua subterránea en las condiciones actuales de calidad en que se encuentra en un pozo de agua para consumo de la ciudad de Chihuahua, mediante pruebas en lote, empleando dos hidrogeles de quitosano sintetizados en el laboratorio: red de quitosano (net-Cs) y red de quitosano con injerto de n-vinilcaprolactama y dimetilacrilamida (net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm) lo que implica realizar las pruebas de adsorción, cinética e isothermas, así como la caracterización, mediante microscopio electrónico de barrido (MEB), de los polímeros antes y después del proceso de adsorción.

Los resultados de este estudio ayudarán a conocer las condiciones específicas de operación para realizar pruebas de remoción de As, F y/o U en un pozo de agua que se emplee para el abastecimiento de agua para consumo humano.

1.4 Hipótesis

El arsénico y flúor soluble del agua subterránea de Chihuahua se adsorbe en hidrogeles de quitosano.



CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL ARSÉNICO, FLÚOR Y URANIO

2.1 Arsénico

Descubierto en el año 1250 por el químico alemán Alberto Magno, el nombre de arsénico es de origen griego “arsenikon” y significa potencia o viril (Muñoz, 2012). El uso del arsénico y sus compuestos fueron famosos a lo largo de la historia por estar ligados a las actividades humanas como agentes medicinales, pero lo que hizo famoso a este elemento fue su relación con muchos envenenamientos o asesinatos. Su uso medicinal fue aplicado por Hipócrates desde aproximadamente el año 400 A.C. con el fin de tratar úlceras de la piel mediante una pasta a base de sulfuro de arsénico (As_4S_4). Posteriormente durante la edad media el trióxido de arsénico fue la herramienta principal y el veneno preferido de los envenenadores de la época debido a su alta toxicidad (Albores et al., 1997). Como algunos de los casos de envenenamiento por arsénico más famosos a lo largo de la historia tenemos a: Napoleón Bonaparte, Nerón, Claudio César, Augusto Germánico y al cardenal Orsini, todos vivieron en distintas épocas, pero se cree que murieron por la misma causa: la provocada por el “rey de los venenos” como antiguamente fue apodado, esto debido a que históricamente no existe ninguna sustancia a la cual se le haya atribuido tantas muertes como al arsénico (Fernández, 2015). Otro de los usos importantes que se le dieron al arsénico fue durante la primera guerra mundial siendo desarrollado y utilizado como arma química (gases arsenicales; Como ejemplo de estos fue el gas Lewisita que actúa como agente vesicante e irritante pulmonar. Posteriormente a principios del siglo XX los compuestos arsenicales fueron utilizados para eliminar enfermedades como la sífilis, tripanosomiasis, la anemia, leucemia y enfermedades pulmonares (Albores et al., 1997). Actualmente su uso medicinal está limitado pues estar expuesto a pequeñas dosis por tiempos prolongados puede conducir a la muerte (Reyna, 2013).



2.1.1 Química del arsénico

El arsénico (As) es uno de los elementos más abundantes en suelos, rocas, agua y aire (Lillo, 2008), pertenece al grupo del nitrógeno (VA en la tabla periódica), tiene un peso atómico de 74.92 g/mol, su número atómico es 33 (Environmental Chemistry, 1995), clasificado químicamente como metaloide con propiedades de un metal y no metal, pero generalmente se refiere a él como un metal (ATSDR, 2007). El arsénico tiene el lugar 20 en abundancia natural (corteza terrestre), el 14 en el agua de mar y ocupa el lugar 12 en el cuerpo humano (Duker et al., 2005).

El arsénico elemental es un sólido de color gris acero (ATSDR, 2007), tiene una densidad de 5.73 g/cm³, con punto de ebullición de 613 °C y punto de fusión de 817°C (Environmental Chemistry, 1995). En su forma elemental el arsénico normalmente se encuentra combinado con otros elementos tales como azufre, carbono, cloro, hidrógeno y oxígeno. Al arsénico combinado con carbón e hidrogeno se le conoce como arsénico orgánico y al combinado con azufre, cloro y oxígeno se le conoce como arsénico inorgánico. La mayor parte de estos compuestos (orgánicos e inorgánicos) son polvos de color blanco opacos cuyo principal problema es que no son evaporables, no tienen sabor ni olor por lo que es casi imposible saber si se encuentran en alimentos, agua o en el aire (ATSDR, 2007). El arsénico inorgánico y orgánico puede encontrarse en muchos tipos de rocas, pero especialmente tienen una afinidad por los minerales que contienen cobre (Ríos, 1999).

Debido a las distintas formas del arsénico en la naturaleza y a su facilidad de combinarse con otros elementos, resulta ser sumamente difícil encontrarlo de forma natural en su estado puro, es más común encontrarlo distribuido en la naturaleza principalmente como: arsénico 0 (elemental), arsénico III (trivalente) y arsénico V (pentavalente) (Reyna, 2013). Las diferencias entre estos distintos estados de oxidación se deben a su facilidad de movilización en el ambiente y su grado de toxicidad. Otra de las cualidades del arsénico, además de sus distintos estados de oxidación, es la facilidad de pasar de un estado de oxidación a otro siendo capaz de participar en un gran número de



reacciones químicas y biológicas, incluyendo reacciones de oxidación-reducción, reacciones de ácido-base, interacciones con otros metales y no metales (Paiva, 2007).

El arsénico es un elemento extremadamente tóxico por sus efectos neurotóxicos y cancerígenos para el organismo humano, no solo es peligroso en altas concentraciones donde el resultado de este tipo de exposición puede ser letales, sino también por los efectos negativos a la salud por consumo prolongado en bajas concentraciones (Cortés et al., 2011). La toxicidad y movilidad del arsénico depende del estado de oxidación y la solubilidad del medio biológico. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: Arsina > As+ 3 inorgánico > As+ 3 orgánico > As+ 5 inorgánico > As+ 5 orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental (Camacho et al., 2011). El Arsénico se encuentra principalmente en el ambiente como arsenito (As (III)) y arsenato (As (V)) (Galetovic et al., 2003).

2.1.2 Fuentes naturales

El arsénico es un elemento presente de forma natural en la corteza terrestre y está ampliamente distribuido en el medio ambiente (aire, agua y suelo), siendo su forma inorgánica una de las más tóxicas (OMS, 2018).

Aparece ampliamente en rocas ígneas y sedimentarias, pero su presencia principal es en minerales sulfurados de cobre, plomo, zinc y oro (Paiva, 2007). Algunos minerales que contienen arsénico en forma natural, son realgar (As_2S_4), orpimente (As_4S_6) y la arsenopirita ($FeAsS$) (Espino et al., 2009). Existen más de 250 minerales que contienen arsénico (Sharma y Sohn, 2009).

Las fuentes naturales y humanas (antropogénicas) introducen una gran cantidad de arsénico al medio ambiente aumentando su concentración y distribución. Un ejemplo de esto son las altas concentraciones de arsénico provenientes de los procesos de la minería que tienen como resultado la liberación de elementos tóxicos de arsénico al medio ambiente (Ostrosky, 2003).

Cuando existe contaminación geológica natural es común encontrar altos niveles de arsénico en el agua subterránea, aproximadamente un tercio del arsénico que se



encuentra en la atmosfera proviene de fuentes naturales como las emisiones volcánicas y el resto de efectos antropogénicos (GreenFacts, 2001).

2.1.3 Arsénico en el suelo

El arsénico tiene el lugar 20 en abundancia de los elementos en la corteza terrestre y se distribuye en el medio ambiente de forma no uniforme, en dependencia de la geología del suelo y las actividades humanas (Rangel et al., 2015), su concentración en el suelo varía ampliamente, en general entre 1 a 40 ppm aproximadamente (ATSDR, 2007), pero en promedio su concentración es de 2 ppm, apareciendo principalmente como impureza de otros minerales (Galvao y Corey 1987).

La presencia y acumulación del arsénico en el suelo es el resultado de procesos geoquímicos y de las actividades antropogénicas como lo son: la minería (debido a la fundición de minerales ricos en arsénico), la ganadería (debido al uso de aditivos en alimentos para el ganado), la agricultura (por la utilización de pesticidas), productos químicos (por ejemplo, químicos para preservar madera), tiraderos ilegales de productos químicos y la quema de combustibles fósiles (carbón mineral) (GreenFacts, 2001).

Por lo tanto, el hombre tiene una importante aportación en la generación de formas tóxicas de arsénico, se calcula que aproximadamente del 80% de arsénico de origen antropogénico, reside en el suelo, la mayoría permanece en forma de partículas y estas partículas se transportan a través del agua (Jones, 2007) principalmente.

2.1.4 Arsénico en el agua

La presencia del arsénico en el agua es debida principalmente a la lixiviación natural de minerales ricos en As en yacimientos geológicos, la descarga de los efluentes industriales, emisiones volcánicas, fertilizantes, y a operaciones de minería y fundición. Los estados de oxidación en que el arsénico se encuentra generalmente en el agua son: As (+5) y As (+3) (Cruz, 2005). En aguas superficiales donde el contenido de oxígeno disuelto es más alto generalmente la especie de arsénico más común es la pentavalente As (+5) y bajo condiciones de reductoras, normalmente en aguas subterráneas la especie dominante de arsénico es el trivalente As (+3) (Sicairos et al., 2011).



De acuerdo a lo anteriormente mencionado el arsénico se puede encontrar en aguas subterráneas y superficiales; donde generalmente es más común encontrarlo es en las primeras, pues al estar durante un tiempo prolongado en contacto con el medio geológico éste terminará disolviendo gran parte de los minerales produciendo altas concentraciones de estos contaminantes (Sepúlveda, 2009). Por esta razón en áreas mineralizadas, principalmente donde existan actividades mineras, puede incrementarse la concentración de arsénico en el agua (Espino et al., 2009).

El agua es uno de los principales medios de transporte del arsénico en el ambiente (Sicairos et al., 2011), donde su concentración dentro de ella será muy variable y dependerá de las formas en que se encuentre en el suelo local (Alarcón et al 2013).

La EPA (United States Environmental Protection Agency por sus siglas en inglés) ha establecido un límite de 0.01 ppm de arsénico en el agua potable, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) de 0.01 mg/L y en México el límite permisible especificado en la norma (NOM-127-SSAI-1994) para arsénico es de 0.025 mg/L.

En el estado de Chihuahua el agua subterránea es el principal recurso para el abastecimiento público, así como para usos industriales y de riego, por lo que la presencia de niveles de arsénico en agua subterránea por encima de la norma (Villalba et al., 2005), obligan a crear alternativas como lo son los hidrogeles de quitosano para contrarrestar los efectos tóxicos de este contaminante en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua.

2.1.5 Arsénico en el aire

Otra fuente importante de dispersión de arsénico en el ambiente es el aire, donde los niveles de concentración en este medio son variables, donde los niveles más altos se pueden encontrar en zonas industriales, niveles intermedios en zonas urbanas y niveles bajos en áreas rurales. Alrededor de un 30% del arsénico presente en la atmósfera proviene de fuentes naturales, por ejemplo, de la actividad volcánica, y el resto proviene de fuentes antropogénicas como la minería y las plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan carbón como combustible (GreenFacts, 2001).

Otra forma de liberación de pequeñas cantidades de arsénico al ambiente es mediante procesos mineros; al refinar el cobre y la plata, estas partículas al estar



suspendidas en el aire pueden ser inhaladas o adsorbidas por la piel cuando se depositan sobre ella (Morgan, 2001).

Los niveles de arsénico en el aire generalmente varían en dependencia de distintos factores como: la zona, clima y la actividad industrial. En zonas rurales los valores se encuentran entre 1 y 10 ng/m³ (nanogramos de arsénico por metro cubico de aire), en zonas urbanas puede alcanzar valores de aproximadamente 20 ng/m³, y en áreas industriales pueden encontrarse valores de hasta 1 µg/m³ (Galetovic et al., 2003).

El arsénico en el aire existe unido a partículas muy pequeñas que pueden permanecer en el aire durante días y viajar largas distancias; estas partículas normalmente son mezcla de arsenito, arsenato y otras especies orgánicas (Morgan, 2001).

2.1.6 Usos y aplicaciones

Las principales actividades humanas que utilizan y emiten arsénico al medio ambiente son: las plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan combustibles fósiles (carbón mineral), los procesos de fundición y refinación de metales (plomo, zinc y cobre), la generación de piezas de electrónica, la industria del vidrio, así como en la elaboración de plaguicidas y pesticidas (Ríos, 1999). México es uno de los principales productores de arsénico en el mundo, con aproximadamente 20% de la producción mundial (Albores et al., 1997). Actualmente China es el principal país productor de arsénico con aproximadamente 25,000 toneladas métricas (Statista, 2017).

2.1.7 Vías de exposición

Las vías de exposición al arsénico, debido a factores naturales y antropogénicos, son variables (Rangel et al., 2015); según la *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* algunas de las formas más comunes de exposición a este elemento son mediante:

- Consumo de alimentos contaminados con arsénico (donde las fuentes principales de arsénico en una dieta cotidiana son: mariscos, arroz, cereales, aves de corral y hongos).
- Por ingesta de polvo o tierra con contenidos arsenicales.
- Por ingesta de agua con arsénico proveniente de fuentes naturales o por contaminación debida a factores antropogénicos.



- Al trabajar o vivir cerca de actividades mineras que involucren la producción o el uso de arsénico (por ejemplo, en refinamiento de cobre o plomo).
- Otra forma de exposición a este elemento es mediante la agricultura por el uso de insecticidas, plaguicidas, fertilizantes, etc.
- Vivir cerca de fábricas industriales que presenten mayor riesgo de presencia de arsénico al fabricar productos como, por ejemplo: cerámica, joyería, pinturas, plaguicidas, vidrio, medicinas, etc.
- Al trabajar con madera tratada con compuestos de arsénico.
- Vivir en algunos sitios de desechos peligrosos que contengan altos niveles de arsénico.

2.1.8 Efectos en la salud

El As se clasifica como uno de los elementos químicos más tóxicos y carcinogénicos, representando un serio problema ambiental no solo en algunas regiones de México sino también del mundo. No solo es peligroso en altas concentraciones, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, también la exposición durante un largo período a bajas concentraciones arsénico (por ejemplo, por ingestión de agua) tiene efectos negativos crónicos para la salud (Figura 1) (Lillo, 2007).



Figura 1. Queratosis por arsénico en las palmas de las manos por consumo prolongado de agua contaminada con arsénico (ATSR, 2007).



Los efectos del arsénico en la fisiología humana son distintos según la exposición a altas dosis en un tiempo corto (efectos agudos) o a dosis bajas durante largo tiempo (efectos crónicos). Algunos de los posibles efectos en la salud por la exposición al arsénico pueden ser clasificados como (Ríos, 1999):

Exposición a altas dosis en un tiempo corto (efectos agudos):

- Náusea, vómitos, diarrea.
- Muerte por envenenamiento.
- Ulceraciones en el aparato digestivo y riñones.
- Lesiones glomerulares.
- En el cerebro: edemas y focos de necrosis o de hemorragias.
- En las uñas se ven bandas transversales, blanquecinas en donde se depositan grandes concentraciones de arsénico.
- Calambres musculares severos.

Exposición a dosis bajas durante largo tiempo (efectos crónicos):

- Cáncer de piel, de pulmón y otros tipos de cáncer.
- Efectos dérmicos: hiperpigmentación, hipopigmentación e hiperqueratosis.
- Daños al sistema respiratorio, el cardiovascular, el genitourinario, el reproductivo, el gastrointestinal y el nervioso.
- Daños al metabolismo.
- Neuritis periférica.
- Trastornos respiratorios (faringitis y bronquitis).
- Trastornos gastrointestinales.

Cuando el arsénico se absorbe en el cuerpo humano, la mayor parte se distribuye rápidamente por la circulación sanguínea a las diferentes partes del organismo, como tejidos blandos, tejidos ricos en queratina (piel o uñas), cabello, etc. El hígado es el principal órgano en el que se lleva a cabo el metabolismo del arsénico mediante un proceso de biometilación, el cuerpo desecha parte del arsénico mediante: heces, sudor, saliva, leche materna y principalmente por la orina (Chouhan y Flora, 2010).



2.1.8 Arsénico en Chihuahua

El origen del arsénico en varios acuíferos del Estado de Chihuahua es natural, debido principalmente a geología de la zona (Alarcón et al., 2013), la situación debida a la presencia de este contaminante en el agua subterránea es crítica por las altas concentraciones que han reportado distintos investigadores y dependencias de gobierno (Tabla 1) a lo largo del Estado, haciendo de esto un problema de salud pública el cual requiere de acciones inmediatas para contrarrestar los efectos negativos que este contaminante tiene en la salud humana.

Tabla 1. Ejemplos de estudios previos de cuantificación de arsénico en el Estado de Chihuahua.

Zona	Concentración (Arsénico)	Referencia
Acuífero Meoqui-Delicias	Entre 0.05 y 0.5 mg/l	CNA, 1996
Acuífero Jiménez–Camargo	Entre 0.05 y 0.5 mg/l	
Acuífero Meoqui-Delicias	Entre 0.01 y 0.375 mg/l	Espino et al., 2009
Acuífero Tabalaopa – Aldama	9 pozos por encima de 0.025 mg/L	Reyes et al., 2011
San Diego de Alcalá	170.337 µg/L (concentración promedio)	López et al., 2011

2.2 Flúor

El primer compuesto de flúor (fluorita o espato de flúor (CaF₂)) se descubrió aproximadamente en el año 1500 en Alemania, el nombre proviene del latín y significa “fluir”. En el año 1529 el mineralogista alemán Georgius Agricola describió a la fluorita como un mineral que se funde fácilmente y era utilizado como fundente en la metalurgia, pues facilitaba la fundición de otros minerales y con ello se obtenía un ahorro en tiempo y en combustible. Posteriormente en el año 1670 el alemán Heinrich Schwanhardt descubrió que al someter a la fluorita a un ácido fuerte se producía un vapor muy corrosivo, que incluso marcaba al vidrio. Este se dio cuenta de las propiedades comerciales que tenía su descubrimiento por lo que lo mantuvo en secreto e inmediatamente se dedicó a fabricar piezas de cristal con dibujos gravados. Posteriormente en 1768 el químico alemán Andrés Segismundo Margraf demostró que la fluorita no contenía azufre además de descubrir que al tratarla con ácidos esta producía



un vapor muy corrosivo que abría agujeros a los instrumentos de cristal (Asimov, 1995). En el año 1771 el sueco Karl Scheele caracterizó el vapor que producía la fluorita al tratarla con ácidos y descubrió que era un ácido y lo llamo “ácido fluórico” el cual actualmente corresponde al ácido fluorhídrico. Karl Scheele como muchos de los químicos de esa época tenía la costumbre de probar y oler cualquier sustancia nueva o desconocida y por esta razón murió a la temprana edad de 44 años como consecuencia de sus trabajos con el ácido fluórico (Asimov, 1982). La historia química del aislamiento del flúor continuó con numerosos casos de científicos intoxicados y muertos por la reactividad de este elemento, hasta que en el año 1886 el químico francés Henri Moissan logró aislar al flúor en forma pura, lo que le otorgó el premio Nobel de Química en el año 1906, murió un año después, el 20 de febrero de 1907 a la edad de 54 años; se pensó que las intoxicaciones que sufrió durante sus experimentos contribuyeron de alguna forma en su muerte (Gutiérrez, 1992).

2.2.1 Química del flúor

El flúor (F) es uno de los elementos con más abundancia en la corteza terrestre; está dentro de la familia de los halógenos con el número y el peso atómico más bajo en el grupo, su número atómico es 9, tiene un peso atómico de 18.9984 (g/mol) (Environmental Chemistry, 1995), en estado puro es un gas de color amarillo pálido de olor muy fuerte muy parecido al del cloro (Gómez et al., 2002). Su punto de ebullición es de $-188.13\text{ }^{\circ}\text{C}$, su punto de fusión es de $-219.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiene una densidad relativa de 1.51 (g/mol) (Kirk y Othner, 1962).

Como característica principal tiene su alta electronegatividad que lo ayuda a combinarse con otros metales para producir fluoruros como el fluoruro de sodio y el fluoruro de calcio, siendo el fluoruro de sodio el que se disuelve más fácilmente en el agua, ambos fluoruros son sólidos de un color blanco (ATSDR, 2003). Es por esto que el flúor es muy difícil de encontrar en su forma pura en la naturaleza, el flúor forma aproximadamente el 0.08% de la litosfera y el 0.001% de la hidrosfera ocupando el lugar 13 de los elementos más abundantes (Kirk y Othner, 1962).

El flúor normalmente forma fluoruros en rocas, el mineral de fluoruro (espato de flúor) es la fuente más importante de flúor y más común en la corteza terrestre; éste



contiene fluorita, criolita y apatita, y generalmente es un compuesto de calcio, fluoruro, sulfatos y carbonatos (Vázquez et al., 1997).

El flúor está presente en casi todos los alimentos de nuestra dieta, pero el agua es la principal fuente de exposición a este mineral (González et al., 2015). El principal problema del flúor es su afinidad por los huesos y los dientes; aproximadamente el 99 % del flúor corporal se encuentra en los huesos y en el esmalte de los dientes provocando importantes problemas de salud en ellos, es por ende que el tratamiento del agua contaminada con este elemento ha tenido una creciente importancia en su estudio (Piñón, 1999).

2.2.2 Fuentes naturales

Los fluoruros y sus compuestos se encuentran de forma natural en rocas, arcillas y en el carbón en la corteza terrestre. Una de las fuentes naturales de la liberación de fluoruros de hidrógeno y otros fluoruros al medio ambiente son las provocadas por la actividad volcánica. Los fluoruros de hidrógeno se liberan al aire cuando las sustancias que contienen fluoruros (carbón, arcillas y otros minerales) son calentados a altas temperaturas; esto puede ocurrir por ejemplo en plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan al carbón como combustible, o en las plantas elaboradoras de vidrios, ladrillos y plásticos, facilitando su liberación (ATSDR, 2003).

Por lo tanto, las rocas, el suelo, el aire, el agua, las plantas, los animales y el ser humano contienen flúor en distintas concentraciones siendo importante su presencia en función del tiempo de exposición y de la fuente misma: natural, contaminación ambiental, médica, etc. (Ryczel, 2006).

2.2.3 Flúor en el suelo

El flúor y sus compuestos en el suelo son de origen geológico, formando sales minerales (Ryczel, 2006). La concentración de fluoruros en los suelos varía aproximadamente entre las 200 y 300 ppm. Los niveles pueden aumentar en áreas con yacimientos minerales de fluoruros, donde haya plantas de energía eléctrica que utilicen al carbón como combustible, en áreas donde la agricultura use abonos que contengan fosfatos y cerca de las industrias que liberen fluoruros al suelo (ATSDR, 2003). La principal



fuentes de flúor en el suelo se encuentran en las zonas mineralizadas donde las rocas ígneas (granito, pegmatita, etc.), pueden realizar una gran aportación de este mineral (Piñón y Pérez, 2011).

2.2.4 Flúor en el agua

El agua es la principal fuente de consumo de flúor en el cuerpo humano (González et al., 2015). La migración del flúor en el agua comienza con la disolución de rocas y yacimientos en el suelo por la acción del agua que fluye a través de estos, el flúor se encuentra en mayor presencia en el agua subterránea donde las condiciones geológicas favorecen su disolución en el agua (Alarcón et al., 2002).

El agua tiene flúor en distintas concentraciones esto en dependencia de su origen (Piñón y Pérez, 2011). En el agua superficial los niveles de fluoruros son de aproximadamente 0.2 ppm, en el agua de mar los valores oscilan entre aproximadamente 0.8 a 1.4 ppm y por último y no menos impórtate los valores para agua subterránea varían normalmente entre las 0.2 ppm hasta valores superiores a las 1.5 ppm en dependencia de la zona (ATSDR, 2003).

De acuerdo a lo anterior, las concentraciones de flúor son menores en el agua superficial que en el agua subterránea, esto debido a que las aguas subterráneas están en contacto por tiempo prolongado con depósitos de fluoritas y otros minerales que se encuentran en el subsuelo, que en conjunto con otros factores como: la temperatura, el pH, presión, entre otros procesos químicos, facilitan la disolución del flúor en el agua subterránea de estos yacimientos ricos en este mineral (Piñón y Pérez, 2011).

De acuerdo con Saxena y Ahmed (2000), la concentración de fluoruros en el agua subterránea depende de varios factores tales como: la concentración del flúor en el mineral, su descomposición, la solubilidad del mineral y el tiempo de contacto con el medio.

La cantidad de fluoruros permisible en agua potable que la EPA (United States Environmental Protection Agency) ha establecido es de 4 mg/L y de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-127-SSAI-1994) es de 1.5 mg/L.



La problemática de la presencia del flúor en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua, radica en las altas concentraciones promedio de flúor (2 mg/L) encontradas en el agua de los pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) (Piñón, 1997), lo cual lo puede ser un problema de salud pública por las repercusiones a la salud (dependiendo de la concentración final que tenga el agua consumida), generadas por la exposición a altas concentraciones de este contaminante en el agua subterránea, es por esto que se buscan nuevas alternativas como lo son los hidrogeles de quitosano para la remoción de estos contaminantes en el agua subterránea.

2.2.5 Flúor en el aire

Los fluoruros pueden ser liberados al aire por distintos medios como lo son las emisiones volcánicas y las plantas de energía. Las erupciones volcánicas liberan fluoruro de hidrógeno en forma de partículas de polvo o gases que serán absorbidos por las nubes y por la lluvia formando ácido fluorhídrico líquido el cual se precipitará en forma de lluvia y se depositarán eventualmente en el agua y el suelo. Otra forma de liberación de fluoruros de hidrógeno al aire es cuando las sustancias que contienen fluoruro, como el carbón, minerales y arcillas, se calientan a altas temperaturas como consecuencia de procesos industriales (ATSDR, 2003).

2.2.6 Usos y aplicaciones

Las principales actividades humanas que utilizan y emiten flúor al medio ambiente son: la fabricación de ciertos compuestos químicos, la elaboración de vidrio (para el anti reflejante), el gravado de vidrio (generalmente en las bombillas), la fabricación de acero, aluminio, cerámicas, pantallas, lubricantes, plásticos, plaguicidas, colorantes, la operación de sistemas de refrigeración (aire acondicionado), y en la medicina en la elaboración de antibióticos. Durante la Segunda Guerra Mundial se utilizó para la obtención de uranio puro (DLEP, 2007). Otro de los usos principales de los fluoruros es en la fabricación de productos dentales (pastas y enjuagues) para la prevención de caries (ATSDR, 2003).

2.2.7 Vías de exposición

Las vías de exposición humana al flúor y sus derivados son generalmente de origen natural. Como se mencionó anteriormente, éste se encuentra de forma natural en la



corteza terrestre de donde es redistribuido al aire y al agua contaminándolos en distintas concentraciones.

Se puede estar expuesto al flúor y sus compuestos en la naturaleza por ejemplo en el aire, agua, plantas y animales, ya sea respirándolos o ingiriéndolos. Otro medio de exposición es por medio del ámbito humano derivado de la contaminación industrial proveniente de la manufactura del plomo, aluminio, acero, fabricación de cristales, esmaltes, etc. Otra forma de exposición es en el ámbito agrícola por el uso de plaguicidas y abonos compuestos de fluoruros (Ryczel, 2006).

2.2.8 Efectos en la salud

La exposición a flúor provoca problemas en la salud humana tales como: irritación de la piel, ojos y de las mucosas nasales (DLEP, 2007). Un consumo prolongado de flúor en el agua, con concentraciones por arriba del límite permisible de 1.5 mg/L, causará problemas de salud como la fluorosis dental y fluorosis esquelética (arriba de 20 mg/L) (Figura 2), además de agravar enfermedades renales (Gómez et al., 2002). Otro de los más importantes efectos nocivos de la exposición a este elemento es la reducción de coeficiente intelectual principalmente en niños (Rocha et al., 2007).

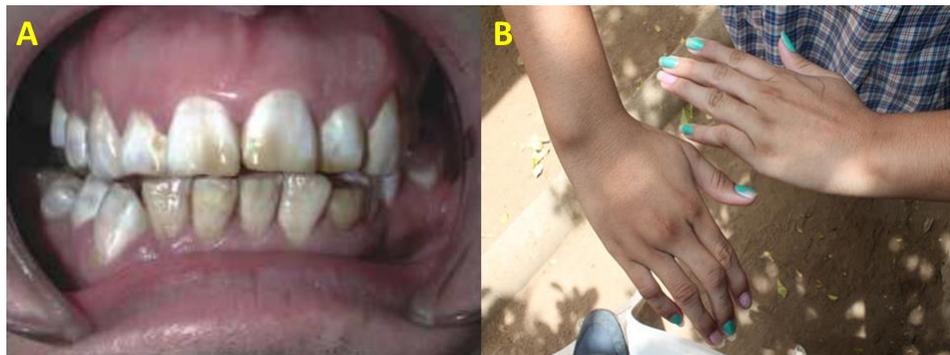


Figura 2. Efecto del flúor en los dientes A) Fluorosis dental y B) fluorosis esquelética (Gómez et al., 2002).

El grado de peligrosidad en las enfermedades causadas por el flúor depende de la cantidad de ingesta diaria y las características nutricionales de cada persona (Hurtado y Gardea, 2011).



2.2.9 Flúor en Chihuahua

La presencia de flúor en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua ha sido objeto de diversos estudios. Muchos investigadores se han dado a la tarea de cuantificar su concentración en el agua potable (Tabla 2), tratando así de encontrar soluciones a esta problemática que afecta a gran parte de la población no solo en la ciudad de Chihuahua, sino también en gran parte del Estado.

Tabla 2. Estudios previos de cuantificación de Flúor en el Estado de Chihuahua.

Zona	Concentración (Flúor)	Referencia
Ac. Chihuahua - Sacramento	2 mg/L (Promedio)	Piñón, 1997
Ac. Tabalaopa - Aldama	3 mg/L (Promedio)	
Ac. El Sauz - Encinillas	3.22 mg/L (Promedio)	
Ac. Chihuahua - Sacramento	2.4 mg/L (en el 90% de los pozos muestreados)	Piñón y Pérez, 2011
Ac. Tabalaopa - Aldama	2.4 mg/L (en el 82% de los pozos muestreados)	
Ac. El Sauz - Encinillas	2.4 mg/L (en el 52% de los pozos muestreados)	
El Valle de Juárez	De 0.28 a 3.44 mg/L	Hurtado et al., 2011
Ciudad Aldama, Chihuahua	De 0.04 y 4.8 mg/L	Villalba et al., 2011

2.3 Uranio

Descubierto en el siglo XVIII (en el año 1789) por el químico alemán Martin Klaproth, cuando analizaba muestras de plata proveniente de las minas checas de Joachimstal. Recibió este nombre en honor al planeta URANO, descubierto 8 años antes, hasta muchos años después, no se le encuentra otra utilidad que la de teñir de color amarillo al cristal o a la cerámica (Artieda, 2009). La primera persona en aislarlo en estado metálico fue E.M. Peligot, en 1841, posteriormente las propiedades radioactivas del uranio fueron descubiertas en 1896 cuando el físico francés Antoine Henri Becquerel generó, por la acción de una sal fluorescente de sulfato de potasio y uranio, una imagen sobre una placa fotográfica cubierta con una sustancia absorbente de luz. Dos años después los esposos Pierre y Marie Curie descubrieron que el Torio emitía el mismo tipo de radiación, independientemente del compuesto químico en el que estuviera presente,



lo que llevaba a la conclusión que dicha característica estaba ligada al átomo y no a las moléculas que estos elementos pudieran formar. Así se comenzó una nueva era donde, elementos hasta entonces desconocidos o simplemente de escaso interés como lo era el uranio, aparecían en escena (Jiménez et l., 1994). Actualmente el Uranio se ha convertido en el combustible base para los reactores nucleares y en la materia prima para la generación de armas nucleares, representando un tipo de energía no renovable ya que no se puede producir, pero es compensado por la existencia de grandes cantidades de este mineral (Greenpeace 2012).

2.3.1 Química del uranio

El uranio es un elemento metálico, radioactivo de origen natural y en estado puro es de color gris, aunque pocas veces es utilizado en esta forma, la forma más común de trabajo es con sus óxidos, aunque en la naturaleza la composición de sus minerales es muy variada, dando lugar a llamativos ejemplares de colores, principalmente verdes y amarillos (Figura 3).

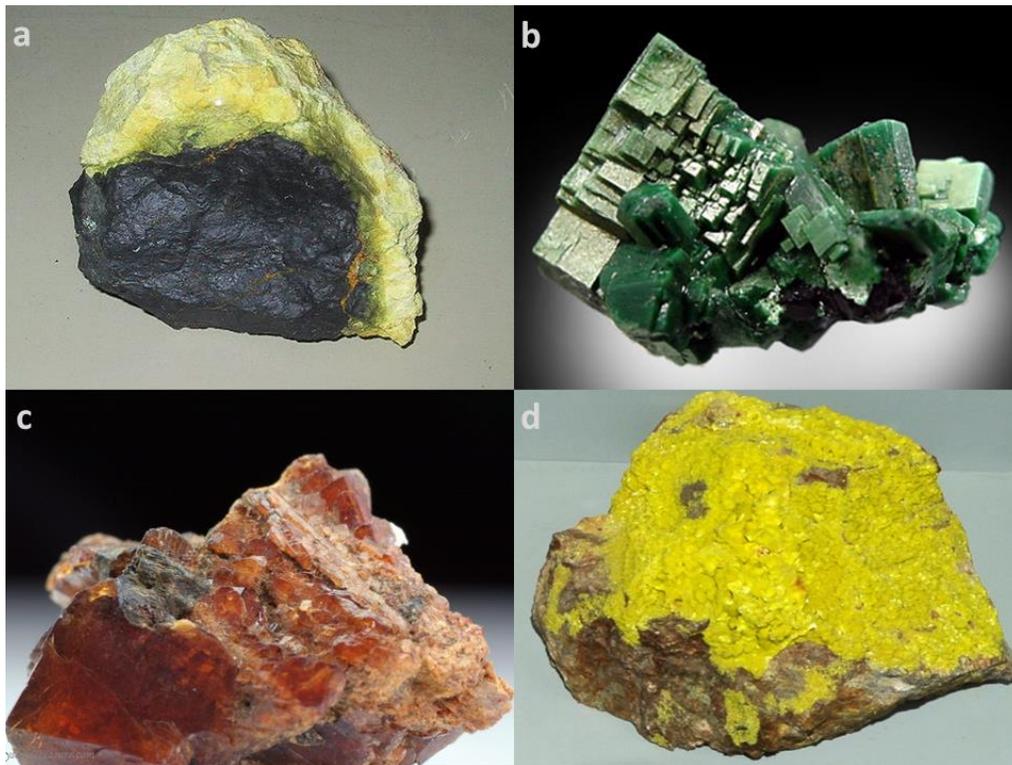


Figura 3. Ejemplos de las formas en que aparece el uranio en la naturaleza a) Plechblenda, b) Torbenita, c) Monacita y Sabugalita (Artieda, 2018).



Se encuentra de manera natural en casi todas las rocas, la tierra y el aire; puede ser redistribuido en el medioambiente a través de la erosión causada por el viento y el agua, y una cantidad mayor puede ser liberada al ambiente a través de erupciones volcánicas. Es un metal muy denso, aproximadamente un 70% más denso que el plomo, aunque menos denso que el oro o el wolframio, fuertemente electropositivo y reactivo, dúctil y maleable, pero mal conductor de electricidad (SGM, 2017). La abundancia del uranio en la corteza terrestre es de 0.0004% del orden de aproximadamente unas partes por millón (ppm), se presenta principalmente en rocas, suelos y agua. El uranio se mide en unidades de masa (gramos) o de radioactividad (curies o becquerels), dependiendo del equipo disponible o del nivel que se requiere medir. Tanto el curie (Ci) como el becquerel (Bq) indican la cantidad de material radioactivo que decae cada segundo (Artieda, 2005).

El uranio en su forma natural está conformado por una mezcla de tres isótopos llamados: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U . El isótopo más común es el ^{238}U ; pues por cada gramo de uranio natural, el 99.28 % de su masa es uranio ^{238}U . Químicamente, los tres isótopos se comportan de manera similar, pero tienen propiedades radioactivas diferentes. El periodo de semidesintegración de los isótopos de uranio (la cantidad de tiempo necesaria para que la mitad del isótopo emita su radiación y se transforme en un elemento diferente) es muy largo (ATSDR, 2013).

Para determinar qué tan radioactivo es el uranio se deben determinar los porcentajes de los tres isótopos en una muestra de uranio. En el caso de uranio que ha estado atrapado en el interior de la tierra durante millones de años, el porcentaje de cada isótopo basado en peso y radioactividad se conoce. Basado en peso, el uranio natural consiste alrededor de 0.01% ^{234}U , 0.72% ^{235}U y 99.28% ^{238}U . Aproximadamente 48.9% de la radioactividad está asociada con el ^{234}U , 2.2% con el ^{235}U y 48.9% con el ^{238}U . El uranio empobrecido es una mezcla de los mismos tres isótopos de uranio excepto que tiene muy poco ^{234}U y ^{235}U . El uranio enriquecido es otra mezcla de isótopos que contiene más ^{234}U y ^{235}U que el uranio natural. El uranio enriquecido es más radioactivo que el uranio natural. Los porcentajes de peso y radioactividad son distintos debido a que cada isótopo tiene



distinta vida-media. La vida-media es el tiempo en el que la mitad del isótopo de uranio emite su radiación y se transforma en un elemento diferente. Las vidas-medias de los isótopos de uranio son muy largas (244 mil años para el ^{234}U , 710 millones de años para el ^{235}U y 4 y medio billones de años para el ^{238}U). Mientras más pequeña es la vida-media, más radioactivo será el elemento. Es así como un gramo de ^{234}U será aproximadamente 20 mil veces más radioactivo que 1 gramo de ^{238}U mientras que 1 gramo de ^{235}U será seis veces más radioactivo que 1 gramo de ^{238}U . Los isótopos radioactivos emiten radiación continuamente según se transforman de un tipo de isótopo a otro (ATSDR 1999).

2.3.2 Fuentes naturales

El ser humano contribuye a que los niveles de concentración natural de uranio se vean incrementados por el resultado de ciertas actividades como lo son: la minería, medicina, investigación tecnológica, armamento, generación de energía eléctrica, movilización de suelos, etc (SIEMCALSA 2009).

2.3.3 Uranio en el suelo

Es encontrado naturalmente en cantidades que varían extensamente; sin embargo, la concentración común en el suelo es $3\ \mu\text{g}$ ($2\ \text{pCi}$) por gramo de tierra. Actividades como las industriales pueden aumentar la cantidad de uranio en el suelo, como por ejemplo la erosión causada por la minería puede provocar que mayores cantidades de uranio sean liberadas no solo al suelo sino a todo el medio ambiente. Los compuestos solubles de uranio pueden combinarse con otras sustancias en el ambiente para crear otros compuestos de uranio, estos compuestos pueden permanecer en el suelo miles de años sin pasar hacia el agua subterránea. Cuando se encuentran grandes cantidades de uranio en el suelo, generalmente son suelos con depósitos de fosfatos. Las plantas pueden absorber uranio desde el suelo a través de las raíces, pero éste se queda depositado en las raíces. Por esta razón las hortalizas, por ejemplo, papas y rábanos, que se cultivan en suelo contaminado con uranio pueden tener una concentración mayor de uranio que si crecieran en suelo con niveles de uranio normales. Lavar los vegetales o removiéndole las cascaras normalmente remueve la mayor parte del uranio (ATSDR, 2013).



2.3.4 Uranio en el agua

El uranio en el agua proviene de distintas fuentes. La migración del uranio comienza con la disolución del uranio de las rocas o yacimientos en el suelo por la acción del agua que fluye sobre o a través de éstos (Závodska et al., 2000). Los minerales de uranio en sus formas oxidadas (uranio hexavalente) son solubles en agua; sin embargo, en sus formas reducidas (U tetravalentes) no lo son. Solamente una pequeña porción proviene de la precipitación de polvo de uranio del aire. Parte del uranio simplemente está suspendido en el agua, como en agua con lodo. El uranio puede combinarse con otras sustancias químicas en el ambiente para formar compuestos de uranio. Cada uno de estos compuestos de uranio tiene diferente solubilidad en agua, y varían entre compuestos insolubles a muy solubles (Artieda, 2009). La solubilidad determina la facilidad con la que el compuesto puede movilizarse a través del ambiente y cuan tóxico podría ser (SGM, 2017). La cantidad de concentración máxima de uranio en agua potable que la EPA ha establecido es de 20 µg/L (20 µg de uranio por litro de agua) y Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) tiene un límite máximo de 0.030 mg/L.

2.3.5 Uranio en el aire

En el aire, el uranio tiene presencia en forma de polvo. Partículas muy pequeñas de polvo de uranio en el aire caen sobre la superficie del agua, de plantas y del suelo debido a la gravedad o la lluvia. Estas partículas de uranio eventualmente terminan de vuelta en el suelo o en el fondo de lagos, ríos y lagunas, en donde se combinan con el uranio que ya se encuentra ahí (ATSDR 1999).

El uranio en el aire, en aguas superficiales o aguas subterráneas puede ser transportado por largas distancias, por lo tanto, estos medios representan la causa principal de la migración del uranio.

2.3.6 Usos y aplicaciones

El principal uso y el más importante del uranio son en plantas de energía nuclear, como combustible para los reactores nucleares que generan calor produciendo el 17% de la electricidad obtenida en el mundo (Greenpeace 2012). También es usado por las fuerzas armadas como blindaje para proteger tanques, para la elaboración de balas y proyectiles



que penetran el blindaje de vehículos del enemigo, como fuente de energía y en armas nucleares. Cantidades muy pequeñas se usan para fabricar barnices en adornos de cerámica, bombillas eléctricas, productos químicos para fotografía y productos para el hogar (Artieda, 2005). También es usada con fines médicos en diagnósticos y tratamientos de ciertas enfermedades. Además, tiene Aplicaciones agroalimentarias: en la producción de nuevas especies, tratamientos de conservación de los alimentos, lucha contra las plagas de insectos y preparación de vacunas (SGM, 2017).

2.3.7 Vías de exposición

Debido a que el uranio se encuentra en todas partes en pequeñas cantidades, constantemente entra a nuestro cuerpo a través del aire, el agua, los alimentos y el contacto con el suelo, aunque la principal vía de exposición es al beber agua con altos niveles de uranio. También puede exponerse a través de la inhalación de vapores contaminados con uranio o por la absorción de agua contaminada con uranio a través de su piel (DES 2016). Las principales formas de exposición al uranio son:

- Los alimentos y el agua potable son las principales fuentes de ingestión para la población general.
- En tubérculos como papas, rábanos y camotes contribuyen la mayor cantidad de uranio en la alimentación. Debido a que el uranio en la tierra puede adherirse a estas verduras, las concentraciones en estos alimentos están directamente relacionadas con las concentraciones de uranio en los suelos donde se cultivan.
- Las personas pueden estar expuestas a niveles más altos de uranio si viven cerca de instalaciones de explotación minera de uranio o de plantas que lo producen o procesan. Las personas también pueden estar expuestas si viven cerca de áreas donde se usan armas con uranio empobrecido.

2.3.8 Efectos en la salud

El uranio natural y empobrecido producen los mismos efectos químicos en el cuerpo. En seres humanos y en animales que inhalaban o ingerían compuestos de uranio se han observado daños en los riñones (ATSDR, 1999). Sin embargo, en soldados que han mantenido fragmentos metálicos con uranio en el cuerpo durante varios años no se les



han observado daños en los riñones. Asimismo, estudios confirman la alta toxicidad del uranio en el agua potable, descubriéndose efectos tóxicos en el riñón incluso en muy bajas concentraciones. Existen estudios en animales que han demostrado que la exposición por inhalación de compuestos de uranio insolubles puede llegar a producir daños en los pulmones. En ratas y ratones machos, se ha demostrado que la exposición al uranio ha disminuido su fertilidad. La aplicación de compuestos de uranio en la piel de animales produjo irritación y daños leves en la piel. Los efectos del uranio natural y empobrecido en la salud se deben más que nada a efectos químicos y no a la radiación (ATSDR 2013).

De acuerdo con la *Community Water Center* los posibles efectos en la salud por la exposición al uranio se pueden clasificar por:

Exposición a corto plazo:

- Náusea, vómitos, diarrea
- Daño al hígado y a los riñones

Exposición a largo plazo:

- Daño a los riñones
- Daño al hígado
- Cáncer (especialmente de los huesos y del hígado)

2.3.9 Uranio en Chihuahua

El origen del uranio en Chihuahua es geológico (Goodel y Waters, 1982), su historia comienza en el año de 1928 cuando se descubrió en la localidad de Placer de Guadalupe, situada en el Municipio de Aldama, uraninita asociada al oro, ésta fue la primera zona radiactiva conocida en México. Posteriormente entre 1959 y 1964 se descubrieron dos minas de uranio de gran importancia, “La Sierra de Gómez” y “El Calvario”, y después se encontró radiactividad en la Sierra de Peña Blanca (Alba y Chávez, 1974). El distrito uranífero de Aldama, Chihuahua se ubica a 70 Km al NE de la Ciudad de Chihuahua, distribuido principalmente en las Sierras del Cuervo, Peña Blanca, de Gómez y Santa Eulalia (Bazán, 1978). En las inmediaciones de la ciudad de Aldama se instaló, durante la época de desarrollo del distrito, una planta de procesamiento del mineral de uranio de la Comisión Nacional de Energía Nuclear- URAMEX (Colmenero et al., 2004).



CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN

3.1 El proceso de adsorción

Es el proceso en el cual las moléculas de un soluto se concentran en una superficie sólida por la acción de fuerzas intermoleculares entre el soluto y el sólido (Figura 4), involucra la separación de una sustancia en una fase fluida acumulando dicha sustancia en la superficie del adsorbente, la adsorción es entonces esencialmente un fenómeno de superficie. Los procesos de adsorción son ampliamente usados en muchas aplicaciones industriales y en la purificación de agua potable o tratamiento de agua residual (Leyva, 2016).

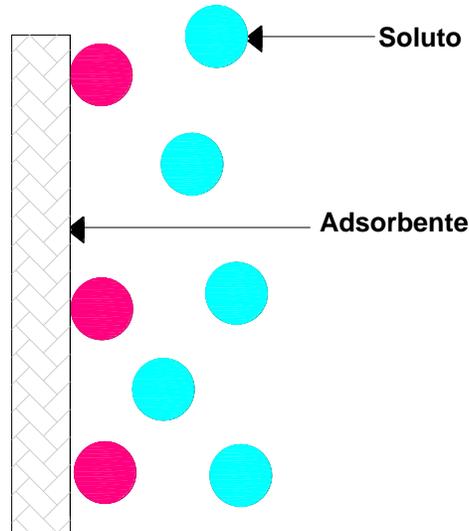


Figura 4. Esquema general del proceso de adsorción (Levy, 2016)

La magnitud de la adsorción (y la velocidad de adsorción) depende de varios factores importantes como la temperatura, pH, la naturaleza de la sustancia adsorbida (soluto), la naturaleza y el grado de subdivisión del sólido (adsorbente), la concentración y presión del soluto.

El Proceso de adsorción requiere de cuatro pasos (Tejeda et al., 1995):

- 1-. Contacto del adsorbente y la solución.
- 2-. Al efectuarse la adsorción el soluto se une preferentemente a la superficie del adsorbente respecto a otros solutos.



3-. Lavado de la columna con una solución que no provoque la desorción del soluto de interés.

4-. Finalmente se efectúa la recuperación del soluto utilizando un fluido que favorezca la desorción, “elución”.

3.2 Isotermas y cinéticas de adsorción

En el análisis de los procesos de adsorción los datos de equilibrio se expresan normalmente como isotermas de adsorción (Tejeda et al., 1995). Una isoterma de adsorción describe el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie (de forma general sobre el límite de una superficie) a una temperatura controlada (Atkins, 1998). Representa la relación matemática entre la masa del soluto adsorbido y la concentración del soluto en una solución una vez que se ha alcanzado el equilibrio (Figura 5) (Leyva, 2016). Las isotermas de adsorción se usan con frecuencia como modelos experimentales que permite estimar el grado de purificación que puede alcanzar una solución acuosa, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del contaminante. Se obtienen a partir de datos de medida por medio de análisis de regresión (Tejeda et al., 1995).

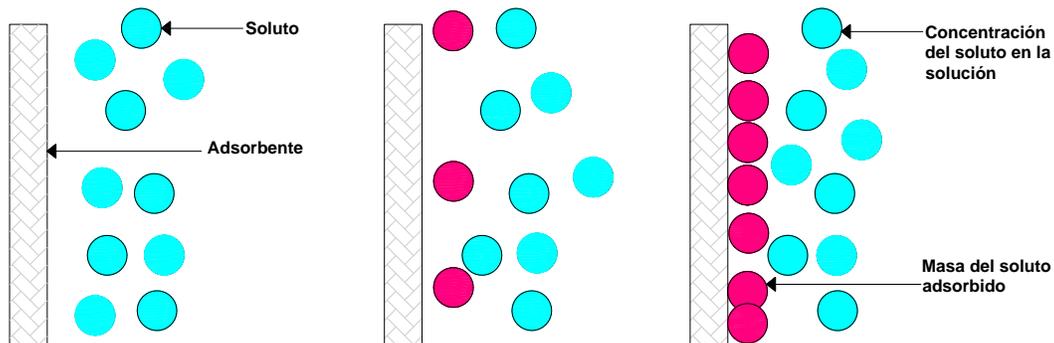


Figura 5. Esquema general de una isoterma de adsorción (Leyva, 2016)

En el campo de la investigación de la remoción de contaminantes es ampliamente utilizado el uso de isotermas de adsorción en la determinación del parámetro “q”, que mide la capacidad de adsorción del soluto en el adsorbente (expresado en mg de soluto/ g del adsorbente) y el parámetro “y” que expresa la cantidad de soluto en la solución después de haber llegado al equilibrio en el proceso de adsorción (Lazo et al., 2008).



En la literatura puede encontrarse una gran variedad de modelos de isothermas de adsorción; a continuación, explicaremos tres de las más usadas en las cuales centraremos especial atención (Figura 6):

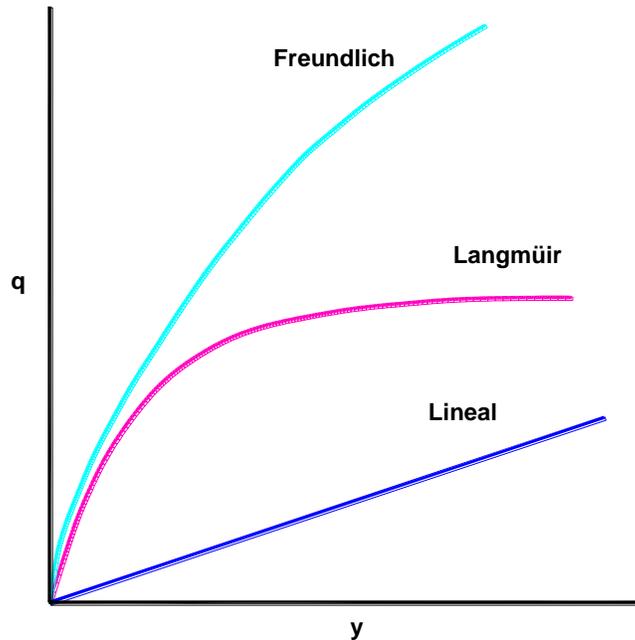


Figura 6. Isothermas de adsorción más comunes (Belter et al., 1988).

Isotherma de Freundlich

Asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, compuesta por grupos de sitios de adsorción de energías características. Además, en esta isoterma se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que sólo se adsorbe en monocapa, la isoterma de Freundlich se describe por medio de la siguiente expresión matemática (Lazo et al., 2008):

$$q = Ky^{1/n} \dots \dots \mathbf{Ec 1}$$

Dónde:

q = Es la capacidad de adsorción (cantidad de soluto adsorbido por cantidad de adsorbente).

y = Es la concentración del soluto en la solución.



K = Constante de capacidad de adsorción.

n = Constante de intensidad de adsorción.

La ecuación linealizada de Freundlich se expresa usualmente en su forma logarítmica:

$$\log(q) = \log(K) + \frac{1}{n} \log(y) \dots \dots \mathbf{Ec 2}$$

Los valores de K y $1/n$ pueden ser obtenidos del intercepto y la pendiente que resultan de graficar $\log(q)$ contra $\log(y)$.

Isoterma de Langmuir

Propone que sobre la superficie del adsorbente existen sitios específicos en los que las partículas del soluto se unen reversiblemente. En un momento dado durante la adsorción coexisten sitios ocupados por el soluto y sitios vacíos, y de acuerdo a lo anterior la capacidad de una molécula para unirse a la superficie es independiente de si hay o no posiciones próximas ocupadas. Además, la adsorción se restringe a una monocapa y no existen interacciones laterales entre las moléculas del soluto. La isoterma está representada por la siguiente expresión matemática (Ecuación 3) (García, 2014):

$$q = \frac{q_m K y}{1 + (K \cdot y)} \dots \dots \mathbf{Ec 3}$$

Dónde:

y = Concentración del soluto en el equilibrio en (mg/L) .

q_m = Capacidad máxima m de adsorción en (mg/g) .

K = Constante de Langmuir de afinidad o energética en unidades de (L/mg) .

Isoterma lineal

La isoterma lineal es la menos común en esta lista, pero puede ser utilizada para aproximar las otras isotermas en la región de baja concentración del soluto. Estas pueden



ser descritas por la ecuación de una recta que pasa por el origen y tiene la siguiente forma (Ecuación 4) (Tejeda et al., 1995).

$$q = Ky \dots \text{Ec 4}$$

Dónde:

q = Es la capacidad de adsorción (cantidad de soluto adsorbido por cantidad de adsorbente).

y = Es la concentración del soluto en la solución.

K = Constante de equilibrio

Las isotermas de adsorción permiten determinar en un sistema soluto-adsorbente, el grado de separación que puede ser logrado y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del soluto. Sin embargo, para el desarrollo del modelo de la adsorción es necesario establecer, mediante el empleo de coeficientes de transferencia de masa, la velocidad de la adsorción o el tiempo necesario para alcanzar una cierta separación.

Cinéticas de adsorción

Las cinéticas de manera sencilla no son otra cosa que la medición de la velocidad con que se lleva a cabo el proceso de adsorción, para lo cual se requiere determinar los niveles de concentración del contaminante en la solución y después del tiempo de contacto, con estos datos se determinan las cinéticas de adsorción. Estas se representan graficando en el eje "Y" la concentración del soluto en la superficie del adsorbente y en el eje "X" el tiempo transcurrido (García et al., 2012).

Para representar los modelos cinéticos de adsorción se emplean dos criterios: la concentración de la solución o la carga en el adsorbente. Generalmente, los modelos de Lagergren de pseudo primer orden y Ho pseudo segundo orden han sido comúnmente usados como modelos simplificados en la dinámica de adsorción (García, 2014).



Modelo de Lagergren

El modelo de Lagergren de pseudo primer orden se define matemáticamente de la siguiente forma (Ecuación 5):

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \dots \dots \mathbf{Ec 5}$$

Integrando la Ecuación # la ecuación resultante queda de la siguiente forma (Ecuación 6):

$$q = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \dots \dots \mathbf{Ec 6}$$

Dónde:

k_1 = Constante cinética de adsorción de primer orden.

q_e = Masa de soluto adsorbida en el equilibrio en (mg/g).

Modelo de Ho

El modelo de Ho de pseudo segundo orden, tiene como particularidad estimar la carga en equilibrio y puede ser representada matemáticamente de la siguiente forma (Ecuación 7):

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \dots \dots \mathbf{Ec 7}$$

Integrando la Ecuación #anterior se obtiene la siguiente forma (Ecuación 8):

$$\frac{1}{(q_e - q)} - \frac{1}{q_e} = k_2 t \dots \dots \mathbf{Ec 8}$$

Dónde:

k_2 = Constante cinética de adsorción de segundo orden.



q_e = Es la cantidad de soluto adsorbido en un tiempo t .

Los parámetros k_1 y k_2 de los modelos cinéticos fueron estimados haciendo coincidir los datos de disminución de la concentración experimental con el modelo cinético. Los mejores valores de los parámetros se obtuvieron mediante un análisis de regresión no lineal utilizando software estadístico y una función adjetiva de mínimos cuadrados.

3.3 Hidrogeles de quitosano

Los hidrogeles son básicamente materia orgánica; se sabe que la materia orgánica, que se encuentra en un pantano o atrapada en un lente arcilloso, genera las condiciones de oxidación-reducción necesarias para adsorber y precipitar sustancias en el agua), los hidrogeles pueden atrapar cationes y aniones en solución al contar con sitios activos que producen enlaces iónicos, además los hidrogeles son relativamente fáciles de sintetizar y probar en el laboratorio para retener metales pesados (Angiboust et al., 2012; Burillo et al., 2014).

Quitosano

El quitosano es uno de los biopolímeros más estudiados actualmente, sus propiedades fisicoquímicas lo han vuelto objeto de estudio, de muchos investigadores, su estructura molecular permite la realización de distintas modificaciones tanto mecánicas como químicas, de las que se pueden obtener múltiples propiedades que abren campo a un gran potencial de desarrollo de estos biopolímeros. Existen diversas aplicaciones reportadas hasta la fecha que van desde el área de la salud hasta la agricultura, tienen una amplia ventaja en el mercado por los beneficios que aporta este polímero como lo son: su biodegradabilidad, su no toxicidad y su biocompatibilidad (Giraldo, 2013). El quitosano, es un compuesto derivado de la quitina proveniente principalmente del exosqueleto de crustáceos industrialmente procesados, tales como la langosta, cangrejo y camarón, es un amino-polisacárido compuesto principalmente de unidades repetitivas de 2- amino-2-



desoxi- β -D-Glucopiranosas, como polímero natural tiene un gran potencial en diferentes aplicaciones (Mármol et al., 2011).

3.4 Experiencias en remoción de arsénico y flúor del agua en Chihuahua y México.

La presencia de contaminantes naturales del agua subterránea y su remoción para dar cumplimiento a lo establecido por la ley (NOM-127-SSA1-1994) ha sido objeto de diversos estudios en el Estado de Chihuahua. Las tecnologías de potabilización, que incluyen la desinfección con cloro y la filtración con grava y arena o el ablandamiento para eliminar la dureza, constituyen la primera etapa de tratamiento para preparar el agua a una etapa de tratamiento avanzado con membranas. Las membranas eliminan contaminantes del agua a nivel de trazas en concentraciones de ppb. Respecto a la remoción de Flúor del agua para consumo humano las alternativas de tratamiento han sido la precipitación química con sulfato de aluminio y polímero aniónico (Piñón 2002), y la hiperfiltración en membranas de ósmosis inversa (Rocha 2002), mientras que para Arsénico, el empleo de resinas de intercambio iónico y la desmineralización mediante membranas de ósmosis inversa (Espino *et al.*, 2009), y la fitorremediación mediante humedales para recuperación de agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa (Alarcón et al., 2011).

En México se han sintetizado y empleado nuevos materiales para la remoción de Arsénico y Flúor de agua para consumo humano, la mayoría de ellos son de origen natural modificado o sintético como arcillas (zeolitas), alúminas, membranas, plantas nativas en humedales, arenas naturales, escorias de hierro, productos químicos coagulantes como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ y cloruro férrico ($FeCl_3$), etc (Tabla 3). La lista de materiales estudiados, tomada del documento “Flúor y Arsénico en agua de consumo humano retos y perspectivas” del (Cimav, 2011) se resumen en la siguiente tabla:



Tabla 3. Estudios previos en remoción de arsénico y flúor en agua subterránea en México.

Arsénico (As)	Flúor (F)	Referencia
Zeolitas naturales modificadas	Alúmina activada sol-gel	Camacho <i>et al.</i>
Al ₂ (SO ₄) ₃ -membranas UF		Mundo Avilla <i>et al.</i>
Escoria de hierro		Mercado-Borrayo <i>et al.</i>
FeCl ₃		Estrada-Orozco <i>et al.</i>
Membranas de nanofiltración		Pérez-Sicairos <i>et al.</i>
EC: Electrocoagulación (electrolitos)		Górtares-Moroyoki <i>et al.</i>
Nanopartículas de hierro		López-Paraguay y Alarcón
Humedales en flujo subsuperficial		Olmos-Márquez et al.
Arenas naturales- FeCl ₃		Villalba et al.
	EC: Al ₂ (SO ₄) ₃ y FeCl ₃	Almazán et al.
	Alúmina y FeCl ₃	Piñón-Miramontes et al.
	Alúmina activada (Al ₂ O ₃)	Medellín-Castillo et al.

En base a lo anteriormente mencionado existen muchos estudios para remover contaminantes en agua subterránea como lo son el Arsénico y Flúor, pero no se ha medido la capacidad de adsorción de los hidrogeles de quitosano en la remoción de estos contaminantes.



CAPÍTULO 4. MARCO FÍSICO

4.1 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se centró principalmente en el Pozo 4 (Tabla 6 y Figura 12), que administrativamente pertenece al acuífero Chihuahua-Sacramento, localizado en el municipio de Chihuahua, en el centro del estado. El municipio de Chihuahua cuenta con una extensión territorial de 9,219 km², y está ubicado geográficamente entre las coordenadas 28°38'12" de latitud norte y 106°04'34" de longitud oeste, en el fin de la región denominada como la Meseta y el principio de la llamada Sierra.

Geopolíticamente limita al norte con el municipio de Ahumada, al noroeste con el municipio de Buenaventura, al oeste con el municipio de Namiquipa y con el de Riva Palacio, al suroeste con el municipio de Santa Isabel y con el municipio de Satevó, al sur con el municipio de Rosales y al este con el municipio de Aquiles Serdán y con el municipio de Aldama (INEGI, 2017).

Por otra parte, el acuífero Chihuahua - Sacramento, con la clave 0830 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del Estado de Chihuahua, dentro de los municipios Chihuahua, Aldama y Aquiles Serdán, cubriendo una superficie aproximada de 1889 km². Geográficamente, la zona se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 28°24'19.7" a 28°56'46" de latitud norte y 105° 57'41.8" a 106°32'48.5" de longitud oeste (Tabla 4 y Figura 7).



Tabla 4. Coordenadas UTM de la poligonal del acuífero Chihuahua-Sacramento.

Vértice	Coordenadas UTM	
	X	Y
1	363486.352	3202822.97
2	373483.895	3196709.39
3	381514.987	3197393.83
4	384193.598	3201408.32
5	393109.195	3188979.31
6	396369.275	3175508.25
7	396791.656	3163109.79
8	400345.937	3158434.54
9	405918.923	3156634.18
10	392943.014	3142605.7
11	361739.737	3152771.25
12	366838.513	3161383.66
13	359107.655	3181197.16
14	349242.703	3202184.5

Este acuífero se ubica en la porción central del Estado de Chihuahua, colinda al norte con el acuífero Sauz-Encinillas, al oeste y suroeste con el acuífero Alto Rio San Pedro, al este con el acuífero Tabalaopa-Aldama y al sureste con el acuífero Villalba, como se muestra en la Figura 7.

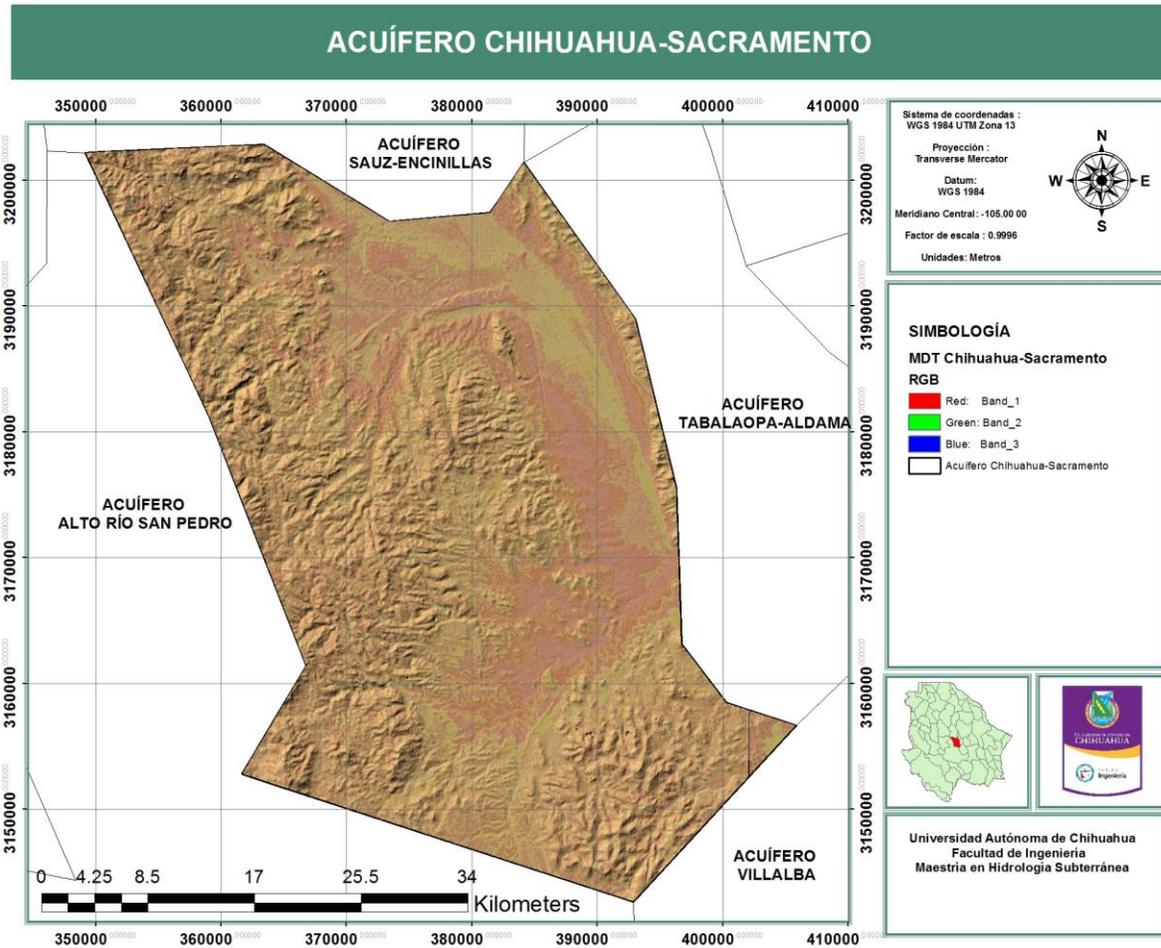


Figura 7. Localización del acuifero Chihuahua – Sacramento (CONAGUA; Arc GIS 10.3).

4.2 Población

De acuerdo con los censos y conteos de población del Instituto Nacional de Estadística y Geografía del año 2010 la zona que abarca el área del acuifero Chihuahua-Sacramento contaba con una población total de cerca de 812,685 habitantes. Casi toda la población que habita en el área del acuifero, pertenece al municipio de Chihuahua, representando el 99.2% de la población total. En el Municipio de Chihuahua hay una población económicamente activa de 351,995 personas, de las cuales el 60.78% son hombres y el 39.22 % son mujeres. Las actividades económicas en el municipio son muy variadas, pero entre las principales se encuentran la industria maquiladora, la industria de la construcción, el comercio y el turismo.



La superficie total sembrada en el Municipio de Chihuahua es de aproximadamente 30,214 hectáreas, de las cuales 16,685 corresponden a temporal y 13,529 son de riego.

4.3 Clima

El clima en la superficie del acuífero Chihuahua-Sacramento, en base al método desarrollado por Köeppen y modificado por García (1973), abarca tres subtipos climatológicos: (Figura 8):

BS1k''w. Clima semiseco templado que presenta lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm, es el clima con menos presencia dentro del acuífero, localizado en la parte superior izquierda de éste (CONAGUA, 2010).

BSokw. Clima árido, templado, temperatura entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente mayor a 22°C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual, es el segundo clima con mayor presencia dentro del acuífero y se localiza en la parte superior derecha del acuífero (CONAGUA, 2010).

BS1kw. Clima semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, la temperatura del mes más caliente es menor de 22°C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual, es el clima con mayor presencia dentro del acuífero (CONAGUA, 2010).

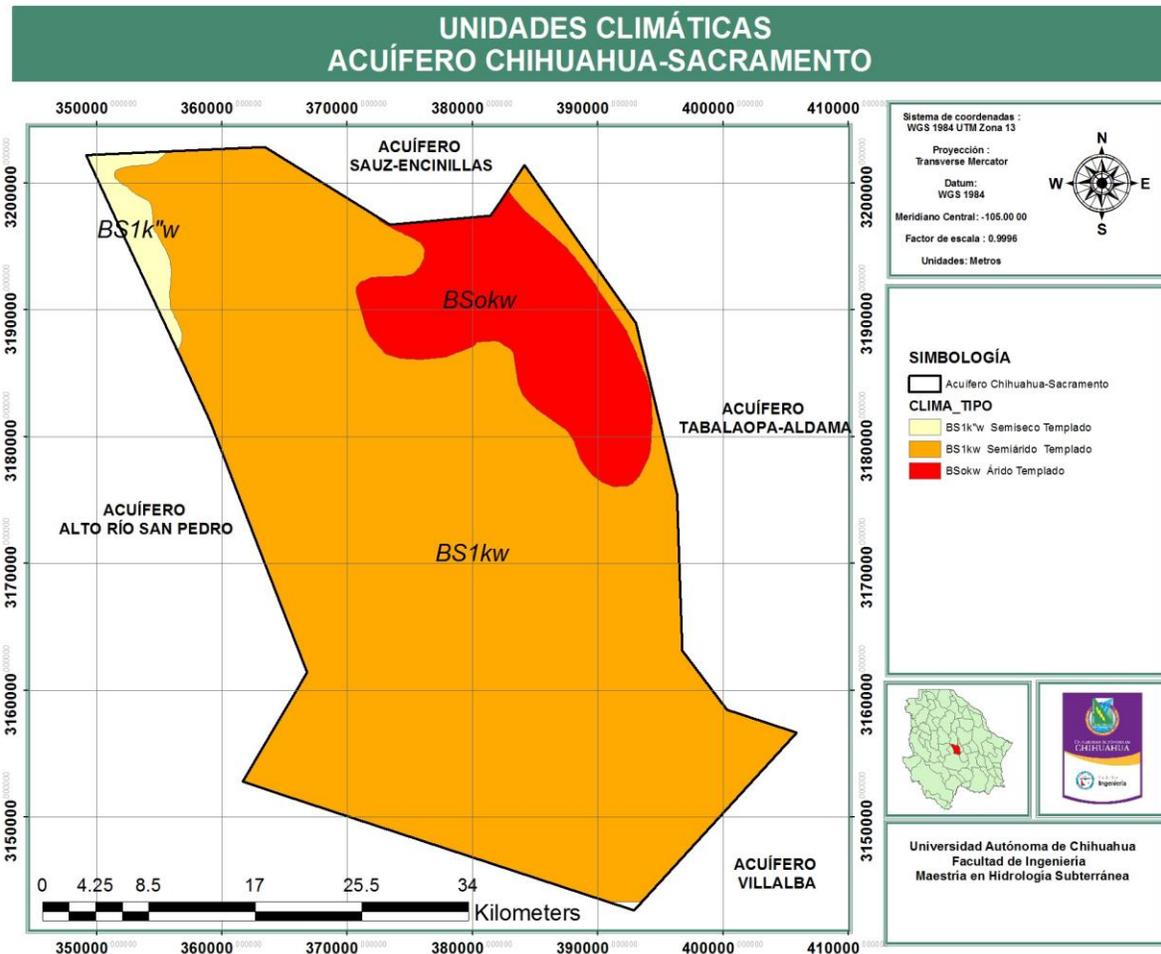


Figura 8. Clasificación climática del acuífero Chihuahua – Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).

4.4 Fisiografía

El acuífero Chihuahua-Sacramento se localiza en la zona de transición entre las provincias fisiográficas Sierra Madre Occidental y las Sierras y Llanuras del Norte (INEGI 2005) (Figura 9).

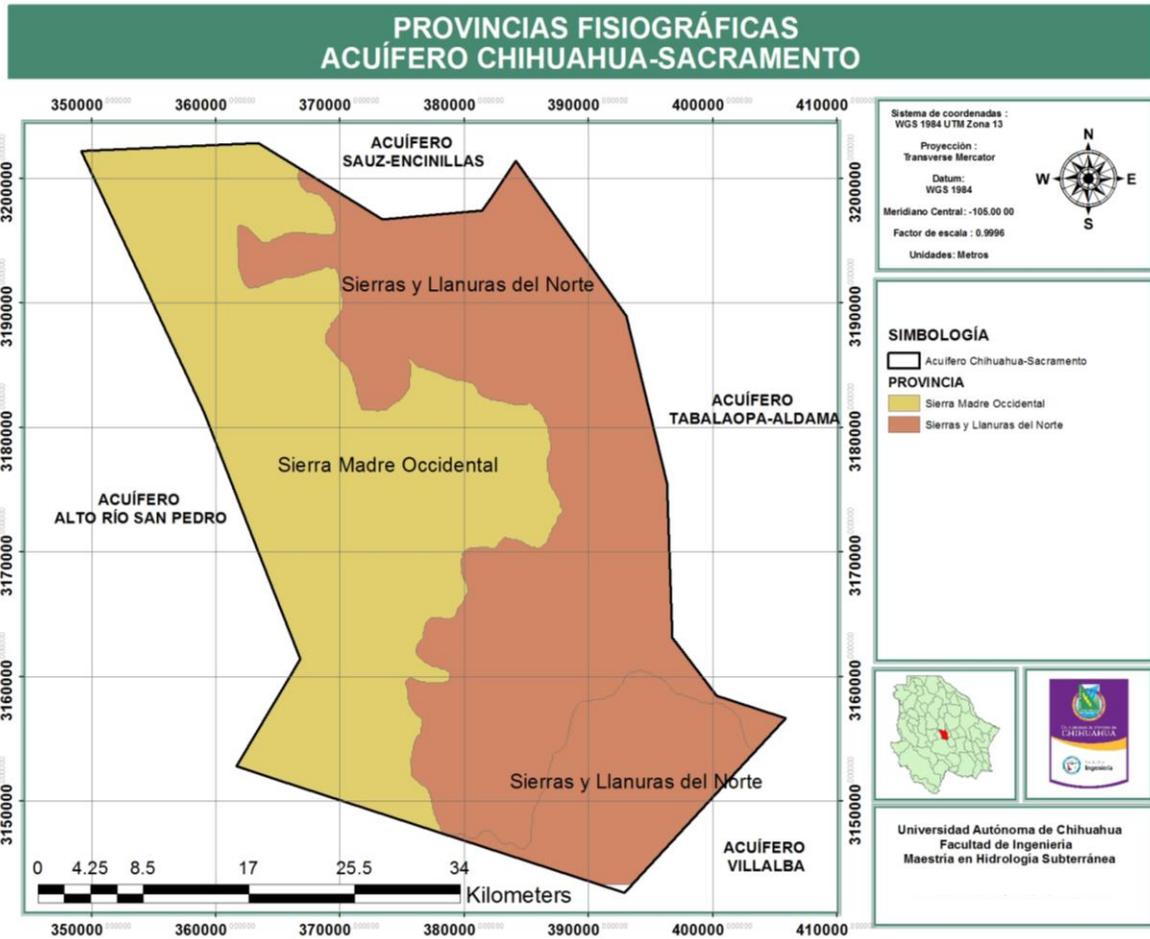


Figura 9. Provincias Fisiográficas, Acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).

La provincia de la Sierra Madre Occidental está formada en su mayor parte por rocas ígneas extrusivas. En sus orígenes era una gran meseta, pero debido a millones de años del proceso de meteorización fue creando un paisaje con mesetas, cañones, picos y barrancas. Se extiende en sentido transversal en dirección NE-SE, además en el sentido longitudinal se extiende cerca de la costa oeste de México. Su forma más amplia está en la parte norte y conforme avanza hacia el sur comienza a ser más estrecha (Figuras 9 y 10). Tiene una altura media de aproximadamente 2250 m (INEGI 2008).

Por otra parte, la provincia de Sierras y Llanuras del Norte está conformada por sierras bajas e inclinadas, separadas entre sí por grandes llanuras, denominados bolsones. Su forma se extiende al igual que su vecina la Sierra Madre Occidental en sentido



transversal en dirección NE-SE y en su sentido longitudinal tiene una inclinación SE, haciéndose más angosta y deforme en su extremo sur (INEGI 2008).



Figura 10. Mapa de Regiones y Provincias Fisiográficas de México (INEGI 2008).

4.5 Hidrografía

El acuífero Chihuahua-Sacramento se encuentra, la mayor parte de él, en la región hidrológica RH-24 denominada “Región Hidrológica Bravo-Conchos”; abarca también al noroeste una pequeña porción de la región hidrológica RH-34 denominada “Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes)”; estas dos regiones hidrológicas abarcan un poco más del 60 % del territorio del Estado de Chihuahua (CONAGUA 2010).

La corriente principal del acuífero es el río Chuvíscar, éste nace en la serranía “La Mesa Montosa” a 35 km del Municipio de Chihuahua a una altitud aproximada de 2300 m,



se dirige hacia el este y es captado en las presas Chihuahua y Chuvíscar localizadas en las inmediaciones de la Ciudad. Durante todo su trayecto urbano el río Chuvíscar se encuentra canalizado, hasta llegar al extremo este de la ciudad donde recibe agua de su principal afluente: el río Sacramento. El río Sacramento, nace en la sierra de Majalca, al noroeste de la ciudad, avanza en dirección este, desciende y llega al valle de Chihuahua, pasa por la localidad de Sacramento, se desvía hacia al sur corriendo paralelamente a la Sierra de Nombre de Dios, entra a la ciudad de Chihuahua, durante este transcurso recolecta los caudales de los arroyos menores de la mancha urbana donde su gasto se ve incrementado con algunos afluentes de aguas residuales hasta desembocar al río Chuvíscar (CONAGUA 2010).

4.6 Geología

La geología es una parte muy importante en la elaboración y desarrollo de estudios ya sea de hidrología superficial o subterránea. Esto debido a que las condiciones geológicas de una determinada zona afectan directamente la composición química del agua.

El acuífero Chihuahua-Sacramento se desarrolla en depósitos aluviales que rellenaron una fosa tectónica limitada por la Sierra de Majalca en su porción sur y la Sierra Nombre de Dios. Este relleno aluvial tiene su mayor volumen en su porción norte del valle y este va disminuyendo acorde avanza hacia la porción sur. Tanto la Sierra de Majalca como la Sierra Nombre de Dios están conformadas por rocas volcánicas, donde localmente afloran principalmente basaltos y andesitas. En el extremo sur del lado oeste de la Sierra Nombre de Dios y en su extremo norte en la localidad minera llamada Estación Terrazas, así como en la parte sur de la Sierra de Majalca, existe presencia de rocas calcáreas (CONAGUA 2015).

4.7 Estratigrafía

La estratigrafía del acuífero Chihuahua-Sacramento está compuesta por un total de 13 tipos de rocas (INEGI 1989) (Tabla 5 y Figura 11), donde las tobas riolíticas, tobas riolíticas-ignimbríticas y los conglomerados polimícticos son las que tienen una mayor



presencia dentro del acuífero, a continuación, se muestran los porcentajes de concentración.

Tabla 5. Clasificación Geológica acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).

Tipo de roca	Área en Km ²	% en Km ²
Aluvión	110.73	5.86
Andesita	110.91	5.87
Andesita-riolita	10.93	0.58
Basalto	102.16	5.41
Brecha sedimentaria polimíctica	4.44	0.24
Caliza	35.8	1.9
Caliza-lutita	0.48	0.03
Conglomerado polimíctico	495.79	26.25
Cuarzo-monzonita	0.33	0.02
Limo	3.69	0.2
Riolita	141.35	7.48
Toba riolítica	523.9	27.74
Toba riolítica-ignimbrita	348.16	18.43
Sumas	1888.67	100

La simbología de los 13 tipos de rocas, sus características principales y su ubicación en el acuífero se explica a continuación (Jackson, 1997; INEGI):

Aluvión (Qal). Roca de tipo aluvial, compuesto por depósitos de grava, arena, limo y arcilla no consolidados, es un material rico en nutrientes, pueden ser usados para la agricultura, se encuentra ubicada en mayor cantidad en la parte noreste del acuífero.

Andesita (TeA, TpaA). Roca ígnea extrusiva, caracterizadas por una estructura granular gruesa. Este tipo de rocas se encuentran ubicadas en cuatro sectores del acuífero, las andesitas del tipo TeA se encuentran ubicadas al noroeste, suroeste y la zona centro del acuífero, las andesitas del tipo TpaA se encuentran ubicadas el noreste del acuífero.

Andesita (KsA). Roca ígnea extrusiva, ubicadas en la zona noroeste del acuífero.

Andesita (TeA). Roca ígnea extrusiva caracterizada por su grano grueso, de edad cenozoica ubicada al noroeste, centro y suroeste del acuífero.

Andesita-Riolita (KsA-R). Roca ígnea volcánica, ubicada en la zona noroeste del acuífero.

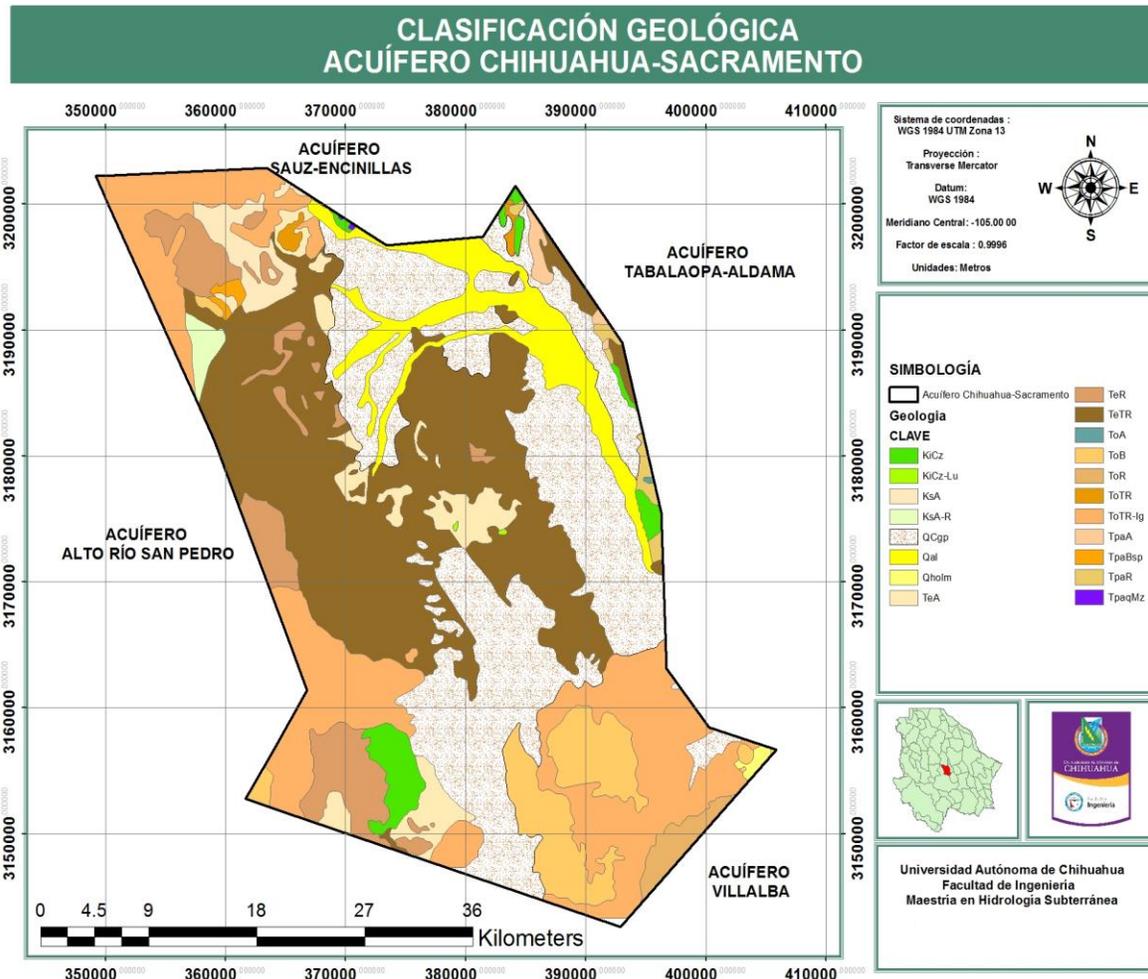


Figura 11. Clasificación Geológica del acuífero Chihuahua-Sacramento (INEGI; Arc GIS 10.3).

Basalto (To B). Roca ígnea volcánica compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica y piroxeno (ortopiroxeno o clinopiroxeno), ubicada en la parte sur este del acuífero.

Brecha sedimentaria polimíctica (TpaBsp). Roca sedimentaria compuesta de clastos angulosos de diferente origen entremezclados en una matriz consolidada, se encuentra ubicada al noroeste del acuífero.

Caliza (KiCz). Roca sedimentaria, ubicada al suroeste, del acuífero así como en menor proporción al noreste y noroeste del acuífero, este tipo de roca está compuesta en forma predominante por minerales de carbonato, principalmente carbonatos de calcio y de magnesio.



Caliza-Lutita (KiCz-Lu). Roca sedimentaria, ubicada en el centro del acuífero, de textura fina afanítica (grano fino) denotando un origen arcilloso.

Conglomerado polimíctico (QCgp). Es un conglomerado, de origen sedimentario formado por depósitos continentales constituidos por conglomerados y arenas conglomeráticas en menor cantidad. Es poco compacto y con cementante calcáreo, sus fragmentos provienen de rocas volcánicas y en ocasiones de rocas ígneas intrusivas. Este tipo de conglomerado se encuentra ubicado en la zona norte, sur y este del acuífero.

Cuarzo-monzonita (TpaqMz). Roca ígnea intrusiva ácida, el termino monzonita implica una roca saturada, esta se ubica en una porción muy pequeña al norte del acuífero.

Riolita (TeR, ToR,TpaR). Roca ígnea extrusiva, con textura afanítica, microcristalina de composición riolítica, ubicadas en diferentes sectores del acuífero, en mayor concentración al sur y al noroeste y en menor concentración en el centro y este del acuífero.

Toba riolítica (TeTR). Roca ígnea extrusiva, constituida por tobas líticas y brechas cuya composición varía de riolítica a riodacítica. Este tipo de rocas se encuentran ubicadas en gran parte del acuífero y se pueden encontrar en el centro al noroeste y al noreste, este tipo de roca es la que tiene mayor porcentaje de presencia en el acuífero.

Toba riolítica-ignimbrítica (ToTR-Ig). Roca ígnea extrusiva, formada por una secuencia irregular de riolitas fluidales y esferulíticas, ignimbritas, tobas riolíticas y brechas volcánicas félsicas, este tipo de roca se encuentra ubicada al noreste, suroeste y sureste del acuífero.



CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

Se inició con la recopilación de estudios previos de la zona de estudio sobre arsénico, flúor y uranio en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua, así como el conocimiento de los hidrogeles de quitosano en cuanto a su uso, elaboración y aplicación en la remoción de diversos contaminantes (en este caso arsénico, flúor y uranio).

Además, se llevaron a cabo nuevas campañas de muestreo en pozos seleccionados a lo largo de la ciudad de Chihuahua y con ello se obtuvieron nuevos resultados en pruebas químicas de alcalinidad, cloruros (Cl), azufre (S), pH, arsénico (As), flúor (F) y uranio (U). Todo esto con el fin de tener muestras que nos permita ver la situación actual de la calidad del agua subterránea en la ciudad de Chihuahua. La síntesis del hidrogel de quitosano (net-CS) se realizó en el laboratorio de Química Analítica de la Faculta de Ciencias Químicas-UACH a cargo de la Dra. María de Lourdes Ballinas.

5.1 Localización y muestreo en pozos seleccionados

La zona de estudio se centró en un conjunto de 8 pozos distribuidos en Chihuahua, Chihuahua y que pertenecen administrativamente a los acuíferos Chihuahua-Sacramento, Tabalaopa-Aldama y El Sauz-Encinillas (Figura 12), los cuales cuentan con registros históricos de altos niveles de concentración de As, F y U en agua subterránea (Peregrino, 2011; Piñón y Pérez, 2011; Villalba et al., 2003). La Tabla 6 y Figura 12 muestran la identificación y distribución de los ocho pozos seleccionados para muestreo en el municipio de Chihuahua.

Tabla 6. Identificación de los pozos muestreados

No. de pozo	Nombre
1	Pozo 1
2	Pozo 2
3	Pozo 3
4	Pozo 4
5	Pozo 5
6	Pozo 6
7	Pozo 7
8	Pozo 8

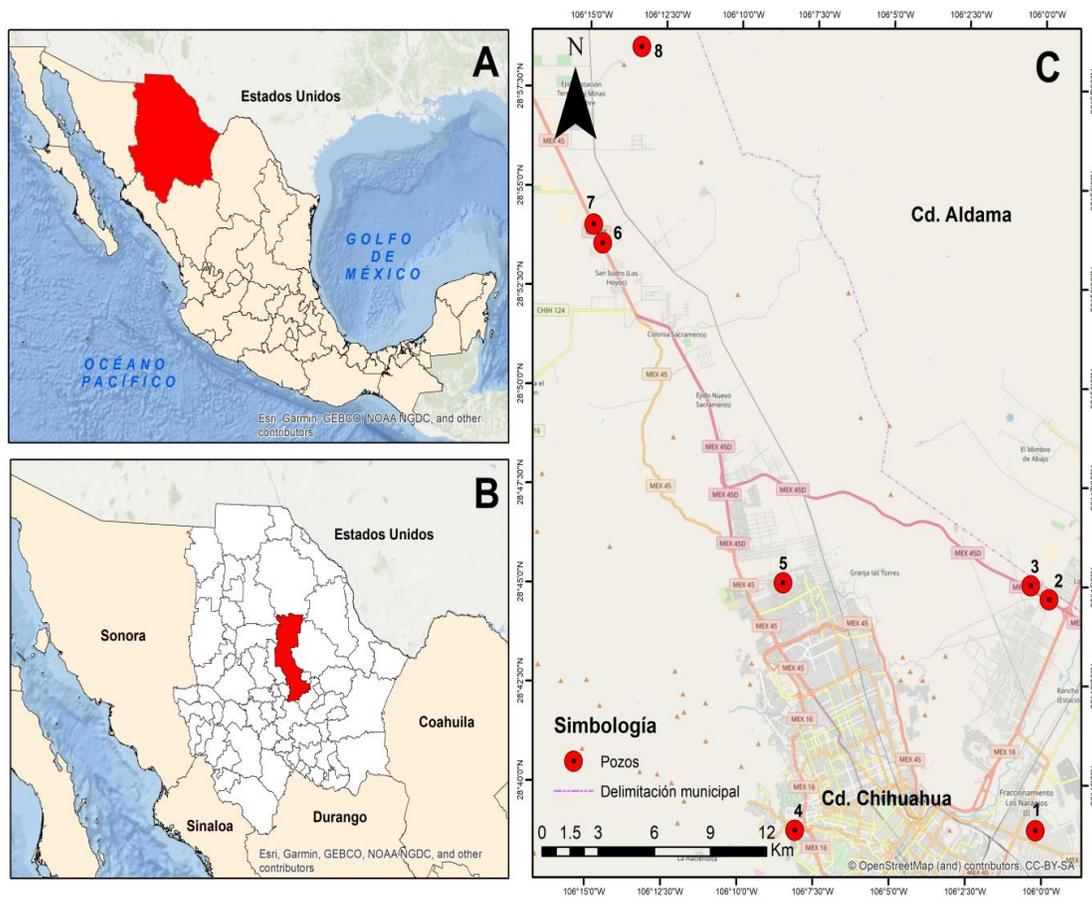


Figura 12. Estado de Chihuahua. B. Municipio de Chihuahua. C. Mapa de localización de los pozos muestreados (INEGI; Arc GIS 10.3).

El muestreo fue realizado primeramente localizando mediante sistemas GPS cada uno de los pozos a muestrear y fueron colocados en el orden mostrado en la Tabla 6, comenzando con un pozo localizado al sur de la ciudad, para luego seguir a la salida este y continuar al oeste, para seguir en la parte norte de la ciudad y finalmente culminar en la parte norte en las afueras de la ciudad con los pozos 6, 7 y 8.

Las muestras fueron tomadas directamente de los pozos con recipientes previamente esterilizados para su posterior sellado y almacenado en una hielera para preservarlas de cualquier factor que pudiera afectar su composición química original.



Figura 13. Toma de muestras de agua subterránea para los pozos seleccionados.

5.2 Síntesis de hidrogeles de quitosano (net-CS)

Materiales y equipo de laboratorio:

- Quitosano marca Sigma-Aldrich
- Formaldehido marca J.T.Baker
- Ácido Acético Glacial marca CTR
- Hidróxido de sodio marca Avantor
- Balanza Analítica
- Recipiente Pyrex
- Desecador
- Estufa



De acuerdo con Pérez-Calixto et al. (2016) la red de quitosano (net-CS) se prepara de la siguiente manera. Como primer paso se prepara una solución de quitosano (CS) (1% en peso/volumen) en ácido acético (10% volumen/volumen) se deja disolver el quitosano dentro de la solución con ayuda de una pastilla de agitación magnética (Imagen 14 y 15), luego se añade a una solución de formaldehído (10% volumen/volumen) y se agita manualmente por 5 minutos hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, la solución se deposita lentamente en recipientes refractarios marca Pyrex, y se deja que el solvente se evapore completamente en una campana de extracción. Las muestras de gel se secan en la campana por 24 h; luego, los recipientes se meten a un desecador por 24 h y finalmente se secan en una estufa por 24 h a 50-60°C, hasta alcanzar un peso constante.

Los films de quitosano seco formados se tratan con una solución acuosa de Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M, en agitación constante, para remover el exceso de ácido acético (Imagen 16). Los films de quitosano se lavan con agua destilada hasta que alcancen un pH de 7 (Imagen 17). Por último, los films se secan en desecador por 24 h, y luego en una estufa por otros 24 h a 40-60°C. Se calcula el peso final del hidrogel formado (Imagen 18).

Preparación de soluciones empleadas para la síntesis del hidrogel

1-. Preparación de la solución de ácido acético (al 10% volumen/volumen)

Se disuelven 80 ml de ácido acético glacial concentrado en 800 ml de agua destilada (Imagen 14).



Figura 14. Preparación de solución de ácido acético (10% volumen/volumen).



2-. Preparación de la solución de CS (1% peso/volumen)

Se disuelven 8 g de quitosano en 800 ml de una solución de ácido acético al 10% (v/v); se utilizó una pastilla de agitación magnética para disolver los 8 gramos de quitosano hasta obtener una solución homogénea (Imagen 15).



Figura 15. Solución de quitosano CS (1% peso/volumen).

3-. Preparación de la solución de quitosano y formaldehído (10% volumen/volumen)

Se disuelven 240 ml de solución de quitosano al (1%) en 24 ml de formaldehído y se agitan manualmente durante 5 minutos.

4-. Preparación de la solución acuosa de Hidróxido de sodio NaOH (0.1 M)

Se disuelven 4 g de Hidróxido de sodio (NaOH) en un litro de agua destilada.

|

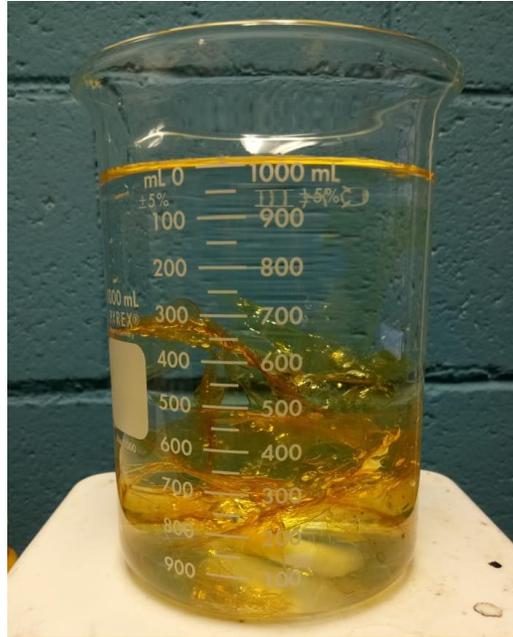


Figura 16. Lavado de los films de quitosano con solución de Hidróxido de sodio (NaOH), para remover el exceso de ácido acético.

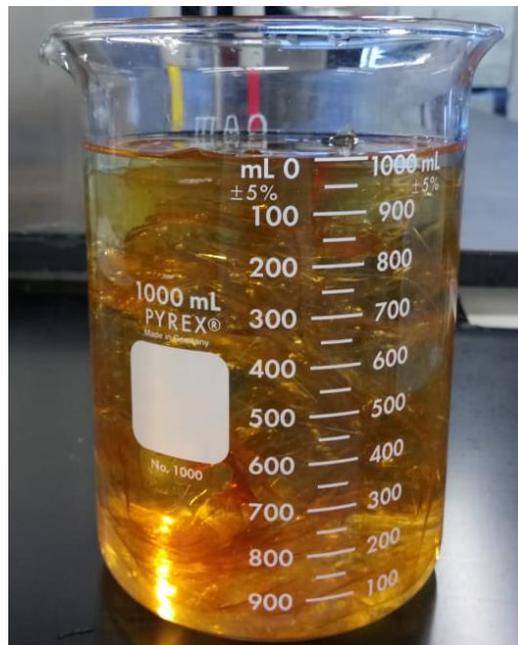


Figura 17. Lavado de los films de quitosano con agua destilada.



Figura 18. Resultado de la síntesis del Hidrogel de quitosano.

5.3 Síntesis de gel de quitosano injertado con n-vinilcaprolactama y dimetilacrilamida ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))

Debido a la complejidad en el proceso de elaboración del hidrogel modificado se solicitó la colaboración del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, a través de la Dra. Guillermina Burillo Amezcua, para la síntesis de este material. La metodología empleada para su elaboración se describe a continuación.

Se inicia con la preparación de una solución de quitosano (CS) al 1% m/v en ácido acético al 10% v/v (Figura 14 y 15). Posteriormente se agregaron los monómeros NVCL/DMAAm en relación 19/1, en un 20% a 80 ml de la solución de CS al 80% v/v. Se colocaron 15 ml de cada solución en ampollitas de vidrio a las cuales se les burbujeó argón durante 20 min para eliminar el oxígeno. Una vez selladas, cada una se irradió 29 min con rayos gamma en la fuente de radiación de ^{60}Co con una intensidad de 10.15 kGy/h y dosis de 5 kGy. Una vez irradiadas, las muestras se precipitaron en acetona, se filtraron a vacío y se lavaron con agua hasta pH neutro, se secaron a vacío y se colocaron los porcentajes de injerto mediante la siguiente relación (Ecuación 10):



$$\% \text{ injerto} = \frac{(W_f - W_i)}{W_i} \times 100 \dots \dots \text{Ec 10}$$

Dónde:

W_f y W_i = Son los pesos de las muestras antes y después del injerto

El siguiente paso fue sintetizar el hidrogel con las muestras injertadas. El quitosano injertado se disolvió en ácido acético (10% v/v) para obtener una solución al (3% p/p), luego se agregó formaldehído (10% v/v) y la solución se agitó manualmente durante 5 min. A partir de entonces, la solución se dejó reaccionar durante 24 h, y luego se dejó evaporar los solventes, hasta que el gel se encuentre totalmente seco, en un tubo de escape capucha. Una vez seco, el gel se lavó en ácido acético (1% v/v) durante 24 h para eliminar el polímero residual, filtrado y se lavó con agua hasta que se alcanzó un pH neutro. Finalmente, el gel se secó en un horno de vacío a 60 ° C durante 24 h, obteniendo el producto final (Figura 19).



Figura 19. Resultado de la síntesis del gel de quitosano modificado.

5.4 Obtención de datos de equilibrio de adsorción (net-CS)

Las pruebas de adsorción se realizaron reuniendo todos los materiales mostrados en la Tabla 7. Como primer paso se comenzó a montar el experimento (Figura 20). En un matraz Erlenmeyer se colocaron 8 g de hidrogel de quitosano (net-CS) en un litro de agua



subterránea, con agitación magnética para simular un entorno natural de agua subterránea y a una temperatura constante de 25°C. En otro matraz se colocaron 8 gramos del hidrogel de quitosano en un litro de agua subterránea ajustando el pH del agua hasta 5.0 con ácido nítrico al 2%. Se tomaron muestras de agua de 100 ml cada 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 10, 50 horas, separando así en dos lotes A y B, donde el lote A se formó de las muestras de agua subterránea natural que después de la prueba de adsorción fueron preservadas con ácido nítrico y el lote B de las muestras de agua subterránea, con ajuste de pH 5, que después de la prueba de adsorción no fueron alteradas. Finalmente una vez concluidas las 50 horas establecidas para las pruebas de adsorción se llevaron ambos lotes al laboratorio de análisis químico del CIMAV, para análisis de Arsénico (As), Uranio (U) y Flúor (F) en agua. La identificación de cada una de las muestras se detalla en la Tabla 8.

Tabla 7. Lista de materiales empleados en las pruebas de adsorción.

Piezas	Materiales
2	8 gramos de hidrogel de Quitosano (net-CS)
1	1 litro de muestra de agua subterránea (inalterada)
1	1 litro de muestra de agua subterránea preservada (p.H= 5)
1	500 ml de ácido nítrico al 2%
1	1 litro de agua destilada
2	matraz Erlenmeyer de 1 litro
2	píldora de agitación magnética
2	Parrilla de agitación magnética
2	Jeringa de 100 ml
12	Recipientes para almacenamiento de 100 ml
1	pH-metro
1	Regulador de temperatura

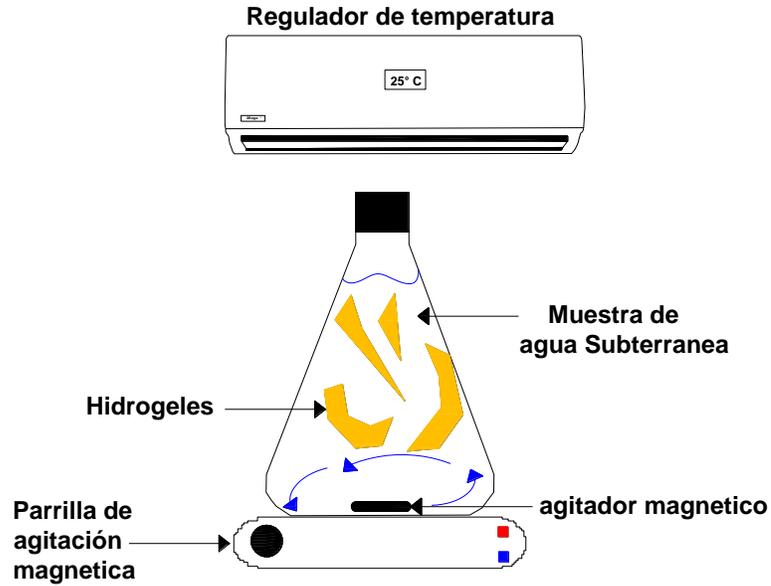


Figura 20. Esquema experimental para las pruebas de adsorción.

Tabla 8. Itinerario de muestreo para pruebas de adsorción.

Lote A		
pH inicial: 5.0	Hidrogel empleado (net-CS): 8 g	pH Final: 8.0
Muestra	Tiempo transcurrido (h)	Hora de muestro
A1	0.5	11 a.m. 22/08/18
A2	1	
A3	1.5	
A4	2	
A5	10	
A6	50	1 p.m. 24/08/18
Lote B		
pH inicial: 7.62	Hidrogel empleado (net-CS): 8 g	pH Final: 8.43
Muestra	Tiempo transcurrido (h)	Hora de muestro
B1	0.5	11 a.m. 22/08/18
B2	1	
B3	1.5	
B4	2	
B5	10	
B6	50	1 p.m. 24/08/18



5.5 Obtención de datos de equilibrio de adsorción con hidrogel modificado ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))

Las pruebas de adsorción se realizaron reuniendo todos los materiales mostrados en la Tabla 9. Como primer paso se comenzó a montar el experimento (Figura 21). En un matraz Erlenmeyer se colocaron 2 g de hidrogel de quitosano injertado con n-vinilcaprolactama y dimetilacrilamida ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm)) en medio litro de agua subterránea, con agitación magnética para simular un entorno natural y a una temperatura constante de 25°C. Se tomaron muestras de agua de 50 mL cada 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 10, 50 horas, el lote F se formó de las muestras de agua subterránea natural que después de la prueba de adsorción fueron preservadas con ácido nítrico al 2%. Finalmente una vez concluidas las 50 horas establecidas para las pruebas de adsorción, las muestras de la prueba fueron llevadas al laboratorio de análisis químico del CIMAV, para análisis de Arsénico (As) y Flúor (F) en agua. La identificación de cada una de las muestras se detalla en la Tabla 10.

Tabla 9. Lista de materiales empleados en las pruebas de adsorción con quitosano modificado.

Piezas	Materiales
1	2 gramos de hidrogel de Quitosano ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm))
1	1 litro de muestra de agua subterránea (inalterada)
1	500 mL de ácido nítrico al 2%
1	1 litro de agua destilada
1	Vaso de precipitado de 500 mL
1	píldora de agitación magnética
1	Parrilla de agitación magnética
1	Jeringa de 100 mL
8	Recipientes para almacenamiento de 100 mL
1	Regulador de temperatura (Mini Split)



Figura 21. Esquema experimental para la obtención de cinéticas de adsorción.

Tabla 10. Itinerario de muestreo para pruebas de adsorción.

Muestra	Lote F	Hora de muestro
	Hidrogel empleado ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm)): 2 g	Hora de Inicio:
	Tiempo transcurrido (h)	12:30 p.m. 22/10/18
A1	0.5	1:00 p.m. 22/10/18
A2	1	1:30 p.m. 22/10/18
A3	1.5	2:00 p.m. 22/10/18
A4	2	2:30 p.m. 22/10/18
A5	10	10:30 p.m. 22/10/18
A6	50	2:30 p.m. 24/10/18

5.6 Obtención de isotermas de adsorción (net-CS)

La realización de las pruebas para obtener las isotermas de adsorción comenzaron reuniendo los materiales mostrados en la Tabla 11, después de lo cual se procedió a montar el experimento (Figura 22) para cada uno de las muestras (A, A1, B, B1, C, C1, D, D1, E y E1) como lo especifica la Tabla 12, separándolas en distintas muestras en dependencia del porcentaje de concentración de cada una (100, 50, 20, 5 y 1%); una vez



separada cada muestra según su porcentaje de concentración se procedió a añadir 8 g de hidrogel de quitosano (net-CS) a cada una de las muestras para comenzar a simular un entorno natural de agua subterránea mediante las píldoras y parrillas de agitación magnética, además de controlar la temperatura a 24°C. Posteriormente se procedió a tomar alícuotas de 100 mL al inicio de la prueba (hora 0) y al final de ella (hora 50), preservándolas cada una con ácido nítrico al 2%. Finalmente, una vez concluidas las 50 horas establecidas para las pruebas de adsorción, se llevaron los lotes resultantes al laboratorio de análisis químico del CIMAV, para su posterior análisis de Arsénico (As) y Flúor (F). La cuantificación de As se realizó mediante ICP-MS con ultranebulizador y la de F mediante el método de ión selectivo. La identificación de cada una de las muestras se detalla en la tabla 12.

Tabla 11. Lista de materiales empleados para la obtención de isotermas de adsorción.

Piezas	Materiales
8	8 gramos de hidrogel de Quitosano (net-CS) por matraz
1	5 litros de muestra de agua subterránea (inalterada)
1	500 mL de ácido nítrico al 2%
1	6 litros de agua destilada
5	Vasos de precipitado de 1 L litro
5	píldora de agitación magnética
5	Parrilla de agitación magnética
5	Jeringa de 100 mL
10	Recipientes para almacenamiento de 100 mL
1	pH-metro
1	Regulador de temperatura (Mini split)

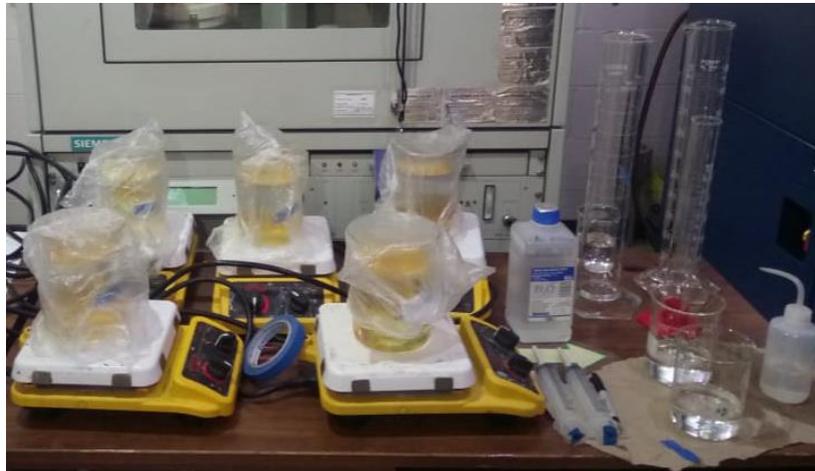


Figura 22. Esquema experimental para la obtención de isothermas de adsorción.

Tabla 12. Cálculo de volúmenes en obtención de porcentajes de dilución.

Muestra	Concentración (%)	Agua Subterránea (mL)	Agua destilada (mL)	Volumen Final (mL)
A y A1	100	1000	0	1000
B y B1	50	500	500	1000
C y C1	20	200	800	1000
D y D1	5	50	950	1000
E y E1	1	10	990	1000

5.7 Cálculo de la capacidad de adsorción del hidrogel

La capacidad de adsorción de los hidrogeles (q), se determinó mediante la siguiente correlación (Ecuación 11):

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{m} \dots \dots \text{Ec 11}$$

Donde:

q = Capacidad de adsorción (mg/g).

C_i = Concentración inicial del soluto (mg/L).

C_e = Concentración del soluto en equilibrio (mg/L).

m = Masa del hidrogel (g).

V = Volumen de la solución en el adsorbente (L).



CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Parámetros físicos y composición química del agua subterránea en Chihuahua, Chihuahua, México.

El agua de los acuíferos proviene principalmente de la precipitación, que al infiltrarse (una parte), transitar por el suelo y al mantenerse en contacto con los diversos materiales geológicos presenta cambios en su composición química. Por ende, la composición química del agua dependerá de su estructura original, de la solubilidad de ciertos minerales que están en contacto con ella, de la temperatura, la velocidad de transporte, de la composición del medio geológico y del tiempo que el agua esté en contacto con dicho medio (Villalobos, 2004).

Es de suma importancia asegurar agua de calidad para uso de la población, en especial para zonas con poca disponibilidad de agua, como lo es la ciudad de Chihuahua. Por desgracia se invierte poco en la investigación y en buscar mejoras para el tratamiento y uso de las aguas superficiales y subterráneas, lo que agrava el problema de sobreexplotación de los acuíferos, causando un desabasto de este líquido vital, así como el deterioro en la calidad en el agua.

Las evidencias de estos problemas son el aumento de padecimientos como la fluorosis dental que afecta a gran parte de la población del Estado Chihuahua (Rodríguez et al., 2011); otro problema es el aumento de riesgo de cáncer, que, aunque no existen evidencias en concreto de que esté relacionado con la ingesta de metales y metaloides como lo son el arsénico y uranio, si está comprobado que aumenta la posibilidad de desarrollar este padecimiento, con un consumo prolongado de agua contaminada (ATSR, 1999). Por ello surge la necesidad de probar alternativas, como lo son los procesos de separación sólido-líquido empleando diversas técnicas y/o materiales: resinas de intercambio iónico, ósmosis inversa, ultrafiltración, precipitación mediante coagulantes, adsorción mediante arcillas y biopolímeros, óxidos, calizas, etc. (Areva, 2014).

Los hidrogeles de quitosano son el motivo de esta investigación, este material es un biopolímero que será empleado para tratar de remover este tipo de contaminantes en el agua subterránea, la experimentación se llevó a cabo mediante pruebas en lote, para lo



cual se realizó primero la síntesis del polímero y posteriormente las cinéticas e isothermas de adsorción.

Para la caracterización hidrogeoquímica se consideraron los resultados de estudios previos de diversas campañas de muestreo y análisis de arsénico, flúor y uranio en agua subterránea en el Estado de Chihuahua en pozos para consumo humano que han contenido históricamente valores altos de estos contaminantes (Peregrino, 2011; Piñón y Pérez, 2011; Villalba et al., 2003).

De acuerdo a lo anterior se seleccionaron 8 pozos con valores históricos altos en concentraciones de arsénico, flúor y uranio, lo cual da prueba de la presencia de estos contaminantes en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua, por lo que dichos pozos fueron muestreados y analizados nuevamente. Los resultados químicos de alcalinidad, cloruros (Cl), azufre (S), pH, arsénico (As), flúor (F) y uranio (U), se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultado de análisis fisicoquímicos de los pozos muestreados (Marzo de 2018). Los valores que superan las normas ambientales aparecen en negritas.

No.	As mg/L	Alcalinidad mg/L	Cl mg/L	F mg/L	pH	U mg/L	S mg/L
LMP	0.025	300	250	1.5	6.5-8.5	0.03	
1	0.044	183.5	61.1	1.94	7.56	0.074	33.844
2	0.032	163.7	32.3	1.72	7.74	0.067	31.733
3	0.067	161.7	21	2.33	7.45	ND	25.422
4	0.104	192.4	9.3	0.9	7.68	0.101	10.711
5	0.041	140.9	6.4	2.09	7.8	0.09	16.191
6	ND	121	4.4	0.24	8.24	0.012	1.436
7	0.004	119	3.9	0.23	8.24	0.091	1.413
8	0.044	184.5	5.9	1.05	7.55	0.086	11.74

Los resultados en cuantificación de arsénico, flúor y uranio presentan valores comparables y en algunos casos superiores en cuantificaciones previas de estos contaminantes dentro y fuera de la zona de estudio, por ejemplo Peregrino, 2011 encontró como máximo 44.428 µg/L de As dentro de nuestra zona de estudio mientras



que, en este análisis, el valor máximo de concentración de arsénico pertenece al pozo 5 con un valor de 0.104 mg/L; mientras que en cuantificación de flúor Piñón y Pérez, 2011 encontraron concentraciones promedio de 2.4 mg/L en la zona de estudio, el valor máximo encontrado en este estudio fue el del pozo 3 con 2.33 mg/L. En cuantificación de Uranio en agua subterránea (Arredondo et al., 2018) obtuvo como máximo una concentración de 10.26 µg/L, mientras que esta investigación se encontró como valor máximo en el pozo 4 una concentración de 101 µg/L.

Los resultados obtenidos en la Tabla 13 fueron tomados como base para elegir cual sería el pozo en el cual se realizarían las pruebas de adsorción, dicho análisis arrojó al pozo 4 como el mejor escenario para la realización de estas pruebas, por contener concentraciones superiores en promedio de estos tres contaminantes (As, F y U). Sin embargo, estos análisis fueron realizados en épocas de sequía (marzo) y las pruebas de adsorción se realizaron en época de lluvias (agosto), provocando una importante decaída en la concentración de estos contaminantes principalmente en la detección de uranio, al muestrear nuevamente dentro del pozo seleccionado. Una posible explicación de lo anterior, sería la dilución de estos contaminantes, provocada por la infiltración de agua meteórica al acuífero, debido a las importantes precipitaciones presentadas durante esta época. Lo cual influyó a solo realizar pruebas de adsorción con As y F, ya que no fue posible detectar uranio de nuevo en este periodo.

6.2 Síntesis del hidrogel de quitosano (net-CS)

Durante el proceso de elaboración del hidrogel de quitosano (net-CS) explicado en el capítulo 5 se sintetizaron aproximadamente 66.7 g de hidrogeles de quitosano empleados en las pruebas de adsorción, estos fueron elaborados mediante el uso de 100 gramos (dos frascos de 50 g cada uno) de quitosano puro de la marca *SIGMA-ALDRICH* con lo cual nos permite obtener un valor aproximado en porcentaje de rendimiento del producto (Ecuación 12).

$$\frac{hs}{Q} * 100 = \% \text{ Rendimiento} \dots \dots \text{Ec 12}$$



Dónde:

h_s = Peso neto del hidrogel sintetizado (g)

Q = Peso del quitosano empleado para la síntesis del hidrogel (g)

Sustituyendo los valores mencionados anteriormente en la Ecuación 12 se obtuvo un rendimiento aproximado del 66.7%, lo cual nos da una idea de la cantidad de quitosano en estado puro a emplear para sintetizar ciertas cantidades de hidrogeles de quitosano en futuras investigaciones. Estos valores son aproximados por el hecho de que existen pérdidas de material por distintos factores como lo es por ejemplo la pérdida por adhesión al material de laboratorio (cazuelas de pesado, palas, recipientes, etc.) al pesar y separar las cantidades de quitosano para realizar la síntesis en laboratorio; otro ejemplo es al momento del secado y el filtrado del producto final cierto porcentaje del hidrogel se pierde durante estos procesos por el traslado de este polímero de un recipiente a otro.

6.3 Cinéticas de adsorción

Las cinéticas de adsorción de As y F, empleando hidrogeles net-CS y (net-CS) -g-NVCL / DAAM, se muestran en las Figuras 23 y 24, donde se puede observar que el equilibrio de adsorción comenzó a materializarse desde la hora 10 del experimento, alcanzado un equilibrio total después de la hora 50 para ambos hidrogeles. La capacidad de adsorción de As utilizando net-CS y (net-CS) -g-NVCL / DAAM fue de 0.014 y 0.0022 mg / g, respectivamente. La capacidad de adsorción de F utilizando net-CS y (net-CS) -g-NVCL / DAAM fue de 0.056 y 0.15 mg / g, respectivamente. El porcentaje de remoción de As utilizando net-CS y (net-CS) -g-NVCL / DAAM fue de 40 y 46%, teniendo un 6% de mayor remoción de As empleado el quitosano modificado ((net-CS) -g-NVCL / DAAM). Para el caso del F en porcentaje de remoción utilizando net-CS y (net-CS) -g-NVCL / DAAM se obtuvieron 1 y 14% de remoción de F, siendo superior en capacidad de remoción el quitosano modificado con un 13% de superioridad respecto al quitosano normal. Una probable explicación respecto a la mayor capacidad de remoción de arsénico respecto al flúor es su mayor tamaño de radio iónico (Radio iónico del arsénico: 1.33 Å vs 0.57 del flúor); además el arsénico, bajo las condiciones de pH obtenidas, normalmente se



presenta en su forma como ión arsenato (Arsénico V) en el agua subterránea lo que aumenta el tamaño de la especie química facilitando su adsorción dentro de la red polimérica. Por otra parte, el quitosano modificado presentó una mayor capacidad de remoción que el hidrogel normal en ambos contaminantes lo cual se puede explicar por la estructura del polímero modificado que presenta una mayor reticulación al tener injertos de otros polímeros disminuyendo su porosidad facilitando con ello la adsorción de contaminantes.

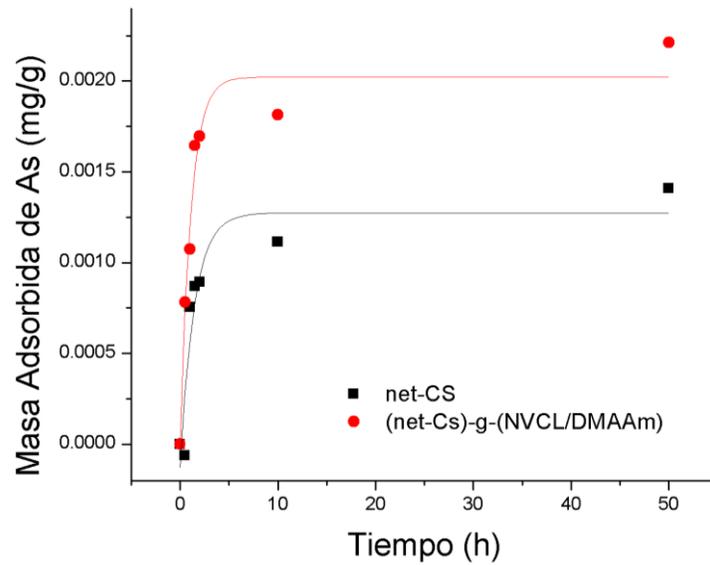


Figura 23. Cinética de adsorción de arsénico empleando net-CS y net-CS-g-NVCL / DAAM.

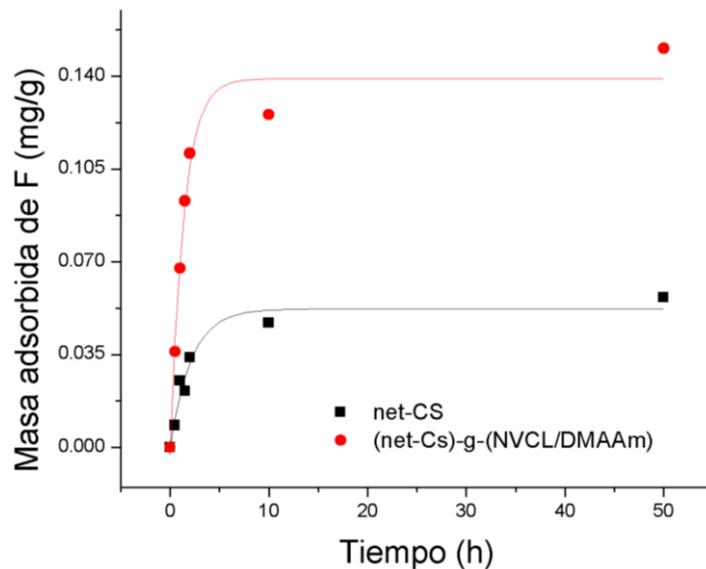


Figura 24. Cinética de adsorción de flúor empleando net-CS y net-CS-g-NVCL / DAAM.



6.4 Isotermas de adsorción

Los datos experimentales se interpretaron con las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir (Ecuación 1 y 3), dicha interpretación arrojó un mejor ajuste mediante el método de Freundlich, tanto como para arsénico como para flúor. Las isotermas corregidas por el método de Freundlich para arsénico y flúor se presentan en las Figura 25 y 26. Las constantes del modelo de adsorción de Freundlich, para ajustar los resultados de las isotermas, se muestran en la Tabla 14. Como se mencionó anteriormente ambas muestras se comportan según la teoría de adsorción de Freundlich lo cual nos permite saber el tipo de fenómeno de adsorción que ocurre en los hidrogeles de quitosano. En este caso el modelo de Freundlich describe una adsorción en monocapa, donde la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea y no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas.

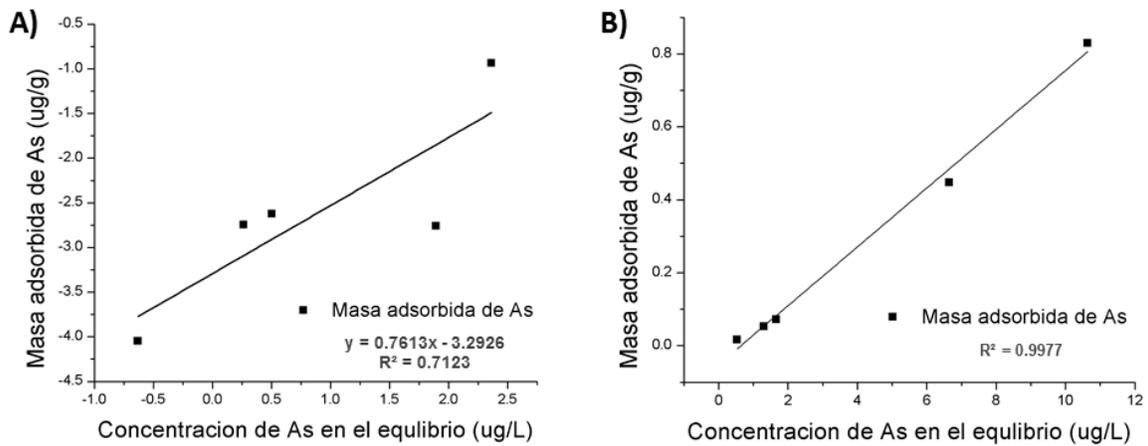


Figura 25. A) Ajuste de Freundlich, B) Isotherma corregida con Freundlich.

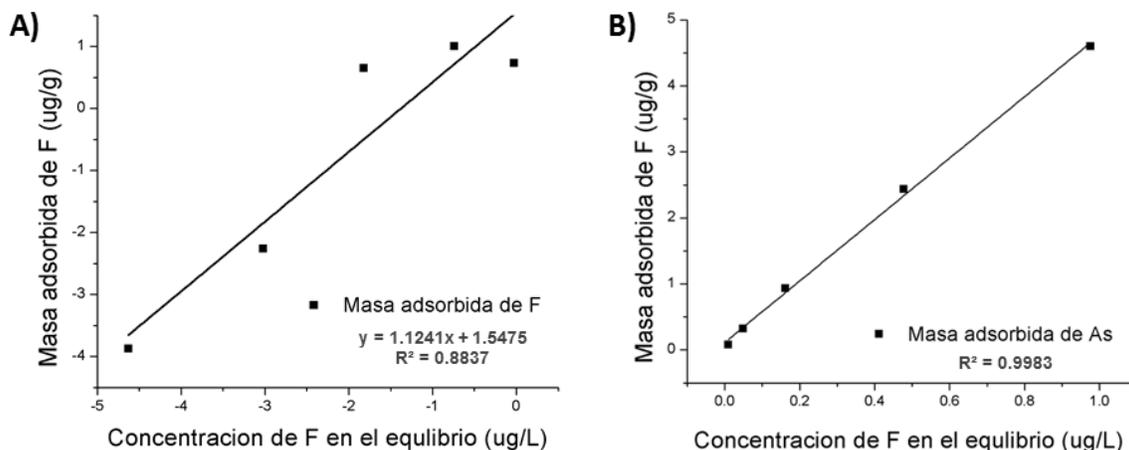


Figura 26. A) Ajuste de Freundlich, B) Isotherma corregida con Freundlich.

Tabla 14. Parámetros de ajuste para las isothermas de adsorción de Freundlich.

Freundlich				
Elemento	T	K	1/n	R ²
	°C	(ug/g)(ug/L) ⁿ		
As	25	0.0371	0.7613	0.9977
F	25	4.6997	1.1241	0.9983

6.5 Caracterización química de los hidrogeles de quitosano por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Las micrografías de MEB (microscopia electrónica de barrido) realizadas a los hidrogeles de quitosano demostraron que la forma que presenta la superficie del net-CS es heterogénea con una estructura en forma de capas (Figura 27 B) y la forma de la superficie que presentó el hidrogel de quitosano modificado (net-CS-g-NVCL / DAAM) es más accidentada posiblemente debido a las múltiples fibras de gel que se encuentran en su superficie (Figura 27 A), esto puede explicar su mayor capacidad de remoción de contaminantes (As y F) respecto al quitosano normal. Por otra parte, el resultado del microanálisis químico realizado mediante espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX) unida a el MEB (Figura 28), revelaron una composición química similar entre los hidrogeles de net-CS y net-CS-g-NVCL / DAAM con la única diferencia en un pequeño porcentaje de contenido de azufre (S) y cloro (Cl) encontrados en el quitosano modificado.



El contenido de C, O y N presente en ambos hidrogeles se explica por el quitosano empleado para su elaboración el cual está compuesto de materia orgánica (exoesqueletos de crustáceos principalmente camarones y langostinos).



Figura 27. A) Imagen del hidrogel modificado (net-CS-g-NVCL / DAAM) en el MEB con electrones secundarios y topografía, en distintos enfoques. B) Imagen del hidrogel (net-CS) en el MEB con electrones secundarios y topografía en distintos enfoques.

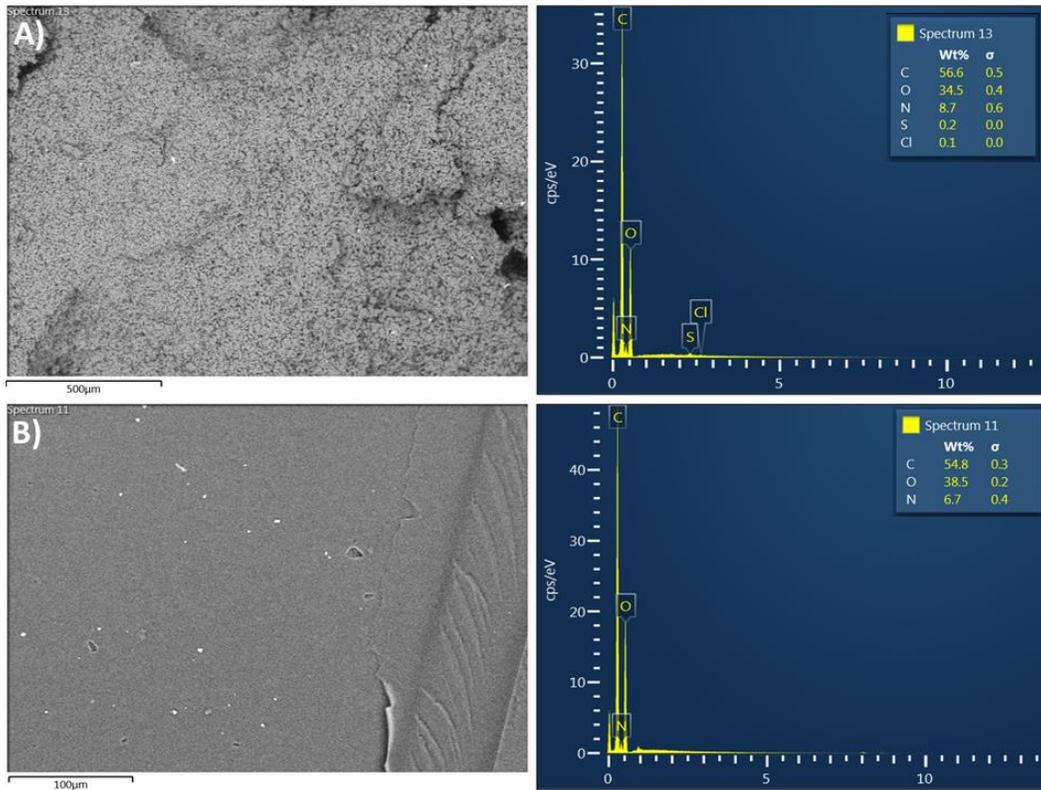


Figura 28. A) Forma y composición química del hidrogel modificado (net-CS-g-NVCL / DAAM) B) Forma y composición química del hidrogel de quitosano (net-CS).



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones y recomendaciones

Las especies acuosas de arsénico presentes en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua se adsorbieron con éxito en los hidrogeles de quitosano (net-CS) y (net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm) sintetizado con una fuente de radiación gamma, mientras que el flúor solo fue adsorbido con éxito en el hidrogel de quitosano modificado ((net-Cs)-g-(NVCL/DMAAm)). De acuerdo con los resultados de las pruebas de adsorción el quitosano modificado presentó una mayor capacidad de remoción de As y F respecto al quitosano normal. La capacidad de remoción de As y F del quitosano normal fue de 40 y 1 por ciento, mientras que para el hidrogel modificado fue de 46 y 14 por ciento, por lo tanto para la remoción de arsénico el mejor polímero sería en teoría el hidrogel modificado por ser un 6 % superior respecto al hidrogel normal en rango de remoción de este contaminante, sin embargo, este porcentaje de superioridad no es significativo respecto al hidrogel normal ya que este tiene una menor complejidad de elaboración y presenta una eficacia similar en remoción de As a la del hidrogel modificado. Por otra parte, en lo que respecta a la remoción de flúor el mejor polímero sería el de hidrogel modificado, esto puede ser debido a que el fluoruro es una especie aniónica con un diámetro hidrodinámico menor que los aniones que forma el arsénico, por lo que en el proceso de adsorción, fue mayormente rechazado de la retícula de los adsorbentes (basados en procesos de fisorción) y por ende menos retenidos que el arsénico. En el caso del quitosano modificado, la reticulación de la malla es más cerrada (debido a los injertos de polímero), de tal forma que se tuvo mayor capacidad de retener al fluoruro, comparado al caso del quitosano sin modificar. La adsorción modelo para los hidrogeles de quitosano (net-CS) obedece a la isoterma de Freundlich, que se explica una adsorción en monocapa y energéticamente heterogénea.

Por otra parte de acuerdo a los resultados del análisis físico-químicos (Tabla 13) para la determinación de contaminantes en la zona de estudio (As, F y U), se encontró que el 75% de los pozos muestreados presentaban valores por encima del límite permisibles de la norma mexicana (NOM-127-SSA1-1994) en concentraciones de arsénico, además el



50% de los pozos muestreados tienen valores por encima de la norma en concentraciones de flúor y por último el 75% de los pozos muestreados presentaron valores por encima de la norma de la EPA en concentraciones de uranio. Algunas de las alternativas para resolver estos problemas serían: cerrar pozos altamente contaminados y sustituirlos con pozos con agua de mejor calidad; como se demostró en los resultados del monitoreo de la química del agua subterránea de la ciudad de Chihuahua, la mezcla de agua de mala calidad con agua de buena calidad podría ser una opción para disminuir los niveles de estos peligrosos contaminantes; otra forma de prevenir el consumo de agua altamente contaminada es mediante la realización de campañas de sensibilización en la población, para alertar a la población de los posibles efectos y repercusiones que pueden tener en la salud ingerir agua con estos contaminantes; otra alternativa es el monitoreo regular de los contaminantes más comunes en la zona: arsénico, fluoruros y uranio en cada fuente de agua potable de la ciudad, por último sería recomendable un estricto cumplimiento de las normas de regularización de estos contaminantes en el agua subterránea, además de disminuir los límites permisibles en arsénico, fluoruros y otros contaminantes en el agua potable, con el fin de disminuir la distribución y consumos de estos contaminantes en el agua potable de Chihuahua.

Se han realizado una gran cantidad de estudios para el tratamiento del agua subterránea, ofreciendo diversas opciones en la eliminación de As, F y otros contaminantes, sin embargo, gran parte de estos métodos no son accesibles económicamente o muy complicados en su materialización a gran escala.

El método de remoción de contaminantes empleando hidrogeles de quitosano merece una revisión especial en su estudio, puesto que ha demostrado ser eficaz en la remoción de As, Fe y otros contaminantes del agua subterránea. Aún queda mucho por hacer y probar en el tema de calidad del agua, puesto que muchos problemas aún siguen esperando soluciones y la investigación debe ser prioridad en los programas de gastos gubernamentales, puesto que la salud de la población en general debe estar en la prioridad de las autoridades tanto locales como nacionales.



Analizando los resultados obtenidos en este estudio es posible visualizar un gran número de factores que se deben analizar en futuras investigaciones relacionadas con este tema, algunos de estos factores son: la realización de más pruebas de monitoreo de la calidad del agua en más pozos del acuífero, monitorear la variación de las concentraciones de contaminantes presentes en el agua subterránea de la ciudad de Chihuahua en distintas épocas del año (época de lluvias y sequia), realizar nuevas pruebas de adsorción variando valores de pH y temperatura, realizar pruebas con hidrogeles de quitosano directamente en pozos de abastecimiento y por ultimo experimentar en pozos localizados en distintos ambientes geológicos.



BIBLIOGRAFIA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (1999). *Reseña toxicológica del Uranio*. Atlanta, Georgia: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2013). *Uranio*. Atlanta, Georgia: Division of Toxicology and Human Health Sciences.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2003). *Fluoruros, Fluoruro de Hidrógeno y Flúor*. Atlanta : División de Toxicología.
- Agricola , G. (s.f.). Bermannus sine de re metallica. En 1558, *De ortu et causis subterraneorum* (pág. 458). Bale.
- Alam, M. G, S. Tokunaga, & F. Stagnitti. (2007). Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants. *J. Environ. Sci. Heath Part A* 42, 447-451.
- Alarcón Herrera, M., Martín Domínguez, A., & Martín Domínguez, I. (2002). CONCENTRACIÓN DE FLÚOR EN EL AGUA POTABLE: SU RELACIÓN CON LA FLUOROSIS DENTAL. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cancún, México: Centro de investigación en Materiales Avanzados.
- Alarcón Herrera, M., Martín Domínguez, A., & Martín Domínguez, I. (2011). *Flúor y arsénico en agua de consumo humano: retos y perspectivas*. Chihuahua, Chihuahua, Mexico.
- Alba, L., & Chávez, R. (1974). Ages of volcanic rocks from the central Sierra Peña Blanca, Chihuahua, Mexico. *Isochron West*, P 21-23.
- Albores, A., Quintanilla Vega , B., Razo, L. M., & Cebrian , M. E. (1997). *Arsénico*. México, D.F: Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del IPN.
- Albores, A., Quintinilla, B., Razo, L., & Cebrian, M. (1997). *Arsenico*. Mexico, D.F.: Cinvestav.
- Alexandra Galetovic Carabantes, & Nilda A.G. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* vol. 39, n. 4, out./dez.



- Armienta, J. (2005). *EL RECORRIDO DE LOS MINERALES*. Madrid, España: Domènech e-learning multimedia, S.A.
- Artieda, J. (2009). *Historia de la Minería del Uranio en Castilla y León*. Castilla y León, España.
- Asimov, I. (1995). Morir en el laboratorio. *ALIANZA*.
- Asimov, I. (1982). Los gases Nobles. *Plaza y Janes*, 173-181.
- Atkins, P. (1998). *Physical Chemistry*. Oxford University Press, 6th ed.
- AURORA ARMIENTA, M., FINKELMAN, R., & RUBIO ARIAS, H. (2013). Medical Geology: Its Relevance to Mexico. *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* , 1-11.
- Bautista Nuñez, R. (1994). *Relacion entre la biotransformacion del arsenico y el desarrollo de tolerancia a sus efectos toxicos*. Mexico, D.F.: Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional.
- Bazán Barrón, S. (1978). *Génesis y Depositación de los Yacimientos de Molibdeno y Uranio, en el Distrito de Villa Aldama*. Chihuahua, Chihuahua : Bol. Soc. Geol. Mexicana.
- Burillo, J., Castro Larragoitia, J., Burillo, G., Ortega, A., & Medellin Castillo, N. (2017). Removal of arsenic and iron from mine-tailing leachate using. *Environ Earth Sci*, P 1-11.
- Camacho L, Gutierrez, M, Alarcon Herrera , Villalba M.L , & Deng, S . (2011). Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and southwestern USA . *Chemosphere* 83 , 211-225.
- Chouhan, S, & Flora, S. J. S. (2010). Arsenic and fluoride: two major ground water pollutants. *Indian Journal of Experimental Biology*, 48, 666-678 .
- Colmenero Sujo, L. (2016). Radiactividad en el estado de Chihuahua. Un peligro para la salud. *Congreso Internacional de Geologia Medica*.
- Colmenero, L., Montero, M., Villalba, L., Rentería, M., Torres, E., & Garcia , M. (2004). Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 7.



- Comisión Nacional del Agua. (1996). *Estudio Hidrológico, Hidrogeoquímico y de la Incidencia de Arsénico, Flúor y Hierro en las Zonas Acuíferas de Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo, Chih.* Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Community Water Center's (CWC). (2017). *Uranio*. Visalia, California: Community Drinking Water Advocacy.
- CONAGUA. (2009). "ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: CHIHUAHUA – SACRAMENTO, LAGUNA EL DIABLO Y EL SAUZ - ENCINILLAS, ESTADO DE CHIHUAHUA". Chihuahua, Mexico: Universidad Autonoma de Chihuahua.
- CONAGUA. (2009). *DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 0830 CHIHUAHUA-SACRAMENTO, ESTADO DE CHIHUAHUA*. México, D.F.: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.
- CONAGUA, GOBIERNO DEL ESTADO, JCAS, JMAS, & UACH. (s.f.). *EVALUACION DE LAS FUENTES ACTUALES DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE FUENTES ALTERNAS Y ANTEPROYECTO DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA NECESARIA*. Chihuahua, Mexico: Universidad Autonoma de Chihuahua.
- Cortés M, J., Ríos C, C., Calderón, C., Rodríguez A, Y., Chávez O, M., & Montellano P, L. (2011). *Efectos neurotóxicos asociados con la exposición a arsénico*. Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Department of Environmental Services (DES). (2018). *¿Hay uranio en su agua potable?* Concord, NH: División de Servicios de Salud Pública del Departamento de Salud y Servicios Humanos de NH.
- Documentación Límites Exposición Profesional. (2007). *FLÚOR, FLUORURO DE HIDRÓGENO Y FLUORUROS INORGÁNICOS, COMO F, EXCEPTO EL HEXAFLUORURO DE URANIO*. España : Instituto Nacional De Seguridad E Higiene En El Trabajo.
- Dra. Ma. Teresa Alarcón Herrera, Dra Luz O. Leal Q, Quim. Silvia Miranda N, Ing. Alejandro Benavides M, & Ignacio R. Martín Domínguez. (2013). *Arsénico en Agua, Presencia, cuantificación analítica y mitigación*. Chihuahua, Chih., México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados.



- Duker A.A, Carranza E.J, & Hale M. (2005). Arsenic geochemistry and health. *Environment international* 31, 631-641.
- Edgar Reyna Rosas. (s.f.). *El arsénico: historia de una pócima actual*. Ciudad de México, México: Cienciorama, UNAM.
- Elizabeth Ramírez, S., Burillo, G., Barrera Díaz, C., Roa, G., & Bilyeu, B. (2011). Use of pH-sensitive polymer hydrogels in lead removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*.
- Espino Valdés, M., Barrera Prieto, Y., & Herrera Peraza, E. (2009). *Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoquí-Delicias del estado de Chihuahua*. 1-11: TECNOCENCIA Chihuahua, Vol. III, No. 1.
- Fernández. (2015). *ECOTOXICOLOGÍA DEL ARSÉNICO: MOVILIZACION EN SUELOS Y AGUAS, RELEVANCIA CLINICA Y METODOS DE ELIMINACION*. Madrid, España: FACULTAD DE FARMACIA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE.
- Figueroa, D., Moreno, A., & Hormaza, A. (2014). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Ingenierías Universidad de Medellín, Vol 14*.
- GARCÍA ASENJO, N. (2014). *UNA NUEVA GENERACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS DE ALTAS PRESTACIONES PARA APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES*. Oviedo, España: UNIVERSIDAD DE OVIEDO.
- García Rojas, N., Villanueva Díaz, P., Campos Medina, E., & Velázquez Rodríguez, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera, vol. 14*, p 109-129.
- García, E. (2004). *MODIFICACION AL SISTEMA DE CLASIFICACION CLIMATICA DE KOPEN*. Mexico D.F. : Instituto de Geografía-UNAM.
- Giraldo, J. (2015). PROPIEDADES, OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES DEL QUITOSANO. *researchgate*, P 1-23.
- Gómez Santos, G., Gómez Santos, D., & Delgado, M. (2002). *Flúor y fluorosis dental, Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias*. Canarias, España : Dirección General de Salud Pública. Servicio Canario de la Salud.



- Goodell, P., & Waters, A. (1982). Uranium in volcanic and volcanoclastic rocks. *AAPG studies in Geology No. 13*.
- GreenFacts. (2001). *Arsénico*. España : Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas.
- Greenpeace. (2012). *Uranio*. Buenos Aires, Argentina.
- Gutiérrez , R. (1992). EL FLÚOR: ESBOZO HISTORICO DE SU AISLAMIENTO. *Elementos No. 16, Vol. 2, Enero - Mayo, 1-7*.
- Hernández Noriega, L., Pérez de la Cruz, J., & Rodríguez Salinas, R. (2001). *CARTOGRAFIA GEOLOGICO-MINERA Y GEOQUIMICA*. Chihuahua, Mexico : CONSEJO DE RECURSOS MINERALES, SUBDIRECCION DE CARTOGRAFIA GEOLOGICO MINERA, GERENCIA DE GEOLOGIA Y GEOQUIMICA, OFICINA REGIONAL CHIHUAHUA.
- Hurtado Jiménez, R., & Gardea Torresdey, J. (2011). *Riesgos a la salud por el exceso de flúor en el agua potable del valle de Juárez, Chihuahua. ¿Hasta cuando se empezará a cumplir la legislación existente?* Chihuahua, Chihuahua : Centro de investigación en Materiales Avanzados.
- INEGI . (2008). *Características Edafológicas Fisiográficas Climáticas e Hidrográficas de México*. Mexico, D.F.
- INEGI. (1989). *Conjunto de datos Geológicos vectoriales*. Escala 1:250,000.
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales Provincias Fisiográficas*. Escala 1:1,000,000.
- INEGI. (2006). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Aguascalientes.
- INEGI. (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Chihuahua : Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (s.f.). *Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas*. Chihuahua : Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jackson, J. (1997). *Glossary of geology*, 4th Ed. Alexandria: American Geological Institute.
- JIMÉNEZ REYES, M., & BULBULIAN, S. (1994). *PIONEROS DE LAS CIENCIAS NUCLEARES*. FONDO DE CULTURA ECONÓMICA S. A. DE C. V.
- Jones F.T. (2007). A broad view of arsenic. *Poultry Science 86, 2-14*.



- Lazo, J., Navarro, A., Sun-Kou, M., & Llanos, B. (2008). *SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS ORGANOFÍLICAS Y SU APLICACIÓN COMO ADSORBENTES DEL FENOL*. Soc Quím Perú.
- Levy Schön, S., & et al . (2016). *FINAL REPORT OF THE PEÑA BLANCA NATURAL ANALOGUE PROJECT*. Álamos, Nuevo México: U.S. Department of Energy.
- Leyva Ramos, R. (2016). *FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN*. San Luis Potosí, Mex. : Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Lillo, J. (2003). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Madrid, España: Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología.
- Modelos Cinéticos de Adsorción*. (s.f.). Obtenido de scribd: <https://es.scribd.com/document/169893232/Modelos-Cineticos-de-Adsorcion>
- Moreno López, M., González Pico, L., & Benavides. (2011). *Cuantificación de Arsénico en Aguas Termales de Importancia Recreacional en el Estado de Chihuahua*. Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Morgan A. (2001). *Arsenic exposure and health effects*. Office of water, office of science and technology. Washington, DC, USA: Health and Ecological Criteria Division. United States Environmental Protection Agency.
- Muñoz Páez, A. (2012). *Historia del veneno, de la cicuta al polonio*. Madrid, España: Debate.
- Murillo, Y., Giraldo, L., & Moreno, J. (2011). DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE 2,4-DINITROFENOL EN CARBONIZADO. *Revista Colombiana de Química*, vol. 40, pp. 91-103.
- Paiva S.L. (2007). *Estudio de biomonitorización de una población de trabajadores expuestos al arsénico y caracterización de los posibles factores moduladores del daño genotóxico*. Universidad Autónoma de Barcelona: Facultad de Biociencias, Departamento de Genética y de Microbiología.
- Peregrino Ibarra, C. (2011). *Caracterización y cuantificación de las especies de arsénico presentes en acuíferos que abastecen de agua potable a la Ciudad de Chihuahua*. Chihuahua, Mexico: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.



- Pérez Sicairos, S., Lin Ho, S., & Félix Navarro, R. (2011). *Remoción de Arsénico Mediante Membranas de Nanofiltración con Carga Superficial Negativa*. Chihuahua, Chih. : CIMAV.
- Philip, C., Waters, C., & Goodell. (1981). Uranium in Volcanic and Volcaniclastic Rocks. *The American Association of Petroleum Geologists*, P 275-277.
- Pinales Munguia, A., & et al . (2011). *MONITOREO DE LA DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA DE LOS ACUÍFEROS CHIHUAHUA-SACRAMENTO Y EL SAUZ-ENCINILLAS*. Chihuahua, Mexico: Universidad Autonoma de Chihuahua.
- Piñón Miramontes, M. (1997). *Eliminación de flúor en agua potable por los métodos de precipitación química y adsorción en alúmina activa*. Chihuahua, Chihuahua : Universidad Autonoma de Chihuahua .
- PIÑÓN MIRAMONTES, M., & PÉREZ HERNÁNDEZ, A. (2011). *ESTUDIO DE MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA ELIMINAR LA PRESENCIA DE FLÚOR PRESENTE EN AGUA SUBTERRÁNEA*. CHIHUAHUA, MÉXICO.
- Rangel Montoya, Edelweiss Airam, Montañez Hernández, Lilia E, Luévanos Escareño, Miriam P, y otros. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, vol. 33, núm. 2, pp. 103-118.
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón, M. T., & Núñez López, D. (2013). *Origen y Evolución del Arsénico en el Sistema Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, México*. Chihuahua, Chih., México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Reyna Rosas, E. (2009). El arsénico: historia de una pócima natural. *CIENCIORAMA 1*.
- Rivera H.M. de L, & Piña S.M. (2002). *Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada*. Jiutepec Morelos: Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua.
- Rocha Amador, D., Navarro, M. E., Carrizales, L., Morales, R., & Calderón, J. (2007). Decreased intelligence in children and exposure to fluoride and arsenic in drinking water. *Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro*, 23 Sup 4, S579-S587.



- Rodríguez Dozal, S., Alarcón Herrera, M., Cifuentes, E., Barraza Villarreal, A., Loyola Rodríguez, J., & Sanin, L. (2011). *FLUOROSIS DENTAL EN COMUNIDADES DE CHIHUAHUA MEXICO*. Chihuahua Chih. México : RETAC.
- Rodríguez V.M., Jiménez-Capdeville M, & Giordano M. (2003). The effects of arsenic exposure on the nervous system. *Toxicology letters*, 1-18.
- Rodybeth Cruz Medina. (2005). *Modelo hidrogeoquímico del arsénico en el acuífero Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, México*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Saxena , V., & Ahmed, S. (2001). Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. *Environ. Geol.* 40, 1084-1087.
- Sepúlveda S.R. (2009). El arsénico en la contaminación de aguas subterráneas. *Redalyc*, Vol. XII, No 3, 239-244.
- SGM. (1997). *Carta Geologico-Minera Chihuahua H13-10 Esc: 1:250,000*. Servicio Geologico Mexicano.
- Sharma V, & Sohn M. (2009). Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformation and remediation. *Environment international* 35, 743-759.
- Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA). (2009). *EL URANIO*. Castilla y Leon, España: Domènech e-learning multimedia, S.A.
- Tejeda, A., Montesinos Cisneros, R., & Guzman , R. (1995). "Tendencias en bioseparaciones". *Ciencia Vol. 46*, P 141-147.
- Trejo Vázquez, R., Alarcón, M., Martínez, Y., Romero, P., & Salvador, J. (1997). Niveles de fluoruros en el agua de los pozos de la ciudad de Durango. *Méx.* 12, 51-57.
- Van Halem D, Bakker S.A, Amy G.L, & Van Dijk J. (2009). Arsenic in drinking water: a worldwide water quality concern for water supply companies. *Drink. Water. Eng. Sci.* 2, 29-34.
- Viades Trejo, J. (2013). *FENÓMENOS DE SUPERFICIE: ADSORCIÓN*. FISICOQUÍMICA DE ALIMENTOS.
- Villalba, L, Royo, M, Chávez, R, Martínez, P, De la Garza, R, Colmenero, L, y otros. (2005). *Estudio geofísico para determinar las causas de la presencia de arsénico en agua de consumo de los pobladores de las comunidades de Km 99 y Orinda, municipio de*



Rosales Chihuahua. Chihuahua, Chihuahua, Mex : Informe técnico, Fondos Mixto, CONACYT-Gobierno del Estado de Chihuahua convocatoria 2005-01.

Villalba, L., Colmenero Sujo, L., Estrada Gutiérrez, G., Pinales Munguía, A., Mireles García, F., & Dávila Rangel, I. (2011). *Análisis del riesgo a la salud por la presencia de flúor en agua de pozos de ciudad Aldama, Chihuahua*. Chihuahua, Chihuahua: CIMAV.

Villalba, M. d., Colmenero Sujo, L., Montero Cabrera, M., Manjón, G., Chávez Aguirre, R., Royo Ochoa, M., y otros. (2005). *Presencia de Uranio en el río Chuvíscar, Estado de Chihuahua, México*. Chihuahua, Mex. : GEOS, Vol. 25, No. 2.

Villalobos, A. (2004). *Sedimentología e hidrogeología del abanico aluvial de la Laguna de Encinillas, Chih.* Chih., México: Universidad Autónoma de Chihuahua.

Závodská, L. (2000). *Environmental chemistry of uranium*. Slovakia.

Zulay Mármol, G., Rincón, M., Araujo, K., Aiello, C., Chandler, C., & Gutiérrez, E. (2012). Quitina y Quitosano, polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Tecnocientífica URU*, P 1-7.



PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- Barbalace, K. (1995 - 2018). *Environmental Chemistry*. Obtenido de Periodic Table of Elements: <https://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/>
- Organización mundial de la salud. (2018). *Arsénico*. Obtenido de <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Othner, K. y. (1962). *Enciclopedia de Tecnología Química*. Obtenido de [files.com/?lp=2&cid=yrrb_yr83_ylr1_irlvhik7i9&pub_account_id=ikBBx2KniEQSWW7ifSUxgLGnz8lbLvWWGOLXvmKXUGJO1TsmEXWFj_cuUqnBUwCc1ZYBI5T-IXY___&h=235581dfe8eb7440a9b506ca577ef9d9&t=NTc2MDQ3NzA___&tts=1540833570&tth=008737b15a5cb7587b351307c7f6786b&pass\[filena](https://files.com/?lp=2&cid=yrrb_yr83_ylr1_irlvhik7i9&pub_account_id=ikBBx2KniEQSWW7ifSUxgLGnz8lbLvWWGOLXvmKXUGJO1TsmEXWFj_cuUqnBUwCc1ZYBI5T-IXY___&h=235581dfe8eb7440a9b506ca577ef9d9&t=NTc2MDQ3NzA___&tts=1540833570&tth=008737b15a5cb7587b351307c7f6786b&pass[filena)
- S.G.M. (2017). *Minería del uranio*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Mineria-del-uranio.html
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Características del uranio*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Caracteristicas-del-uranio.html
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *El uranio en México*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/El-uranio-en-Mexico.html



ANEXO

Anexo electrónico