



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y

ARQUITECTURA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E

INVESTIGACIÓN

Eliminación del Arsénico (As) por Electroquímica, en Aguas
Subterráneas. para CONSUMO HUMANO. CASO DE ESTUDIO
"Municipio San Salvador Hidalgo"

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PRESENTA:

ING. JOSÉ ROBERTO RODRÍGUEZ MEJÍA

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. RICARDO CONTRERAS
CONTRERAS

México D.F. junio DE 2012





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 22 del mes junio del año 2012, el (la) que suscribe José Roberto Rodríguez Mejía alumno (a) del Programa de Maestría en Ingeniería Civil con número de registro A100270, adscrito a Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. Ricardo Contreras Contreras y cede los derechos del trabajo intitulado “Eliminación del Arsénico (As) por Electroquímica, en Aguas Subterráneas para su Potabilización en el Municipio San Salvador Hidalgo.”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección robe.tt@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

José Roberto Rodríguez Mejía

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas especiales a las que les gustaría agradecerles su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar donde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darle las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Le doy gracias a Dios por darme la oportunidad de presentar esta Tesis, gracias Dios mío porque en esta etapa de mi vida nos uniste como familia nos pusiste pruebas difíciles y lo mejor nos diste la sabiduría de entender y superarlas, también te doy gracias por regalarme a una Muñeca llamada Yaudi y un bebe(a) que viene en camino.

A mi esposa Yaudi por el amor, la confianza y el apoyo que me brindó durante la realización de este trabajo y a mi futuro hijo(a) a quien les dedico mi esfuerzo. *Mi táctica es, quedarme en tu recuerdo, no sé cómo, ni sé, con qué pretexto, pero quedarme en vos (Mario Benedetti).*

A mi Madre: No dejo de pensar en los primeros pasos, si hay algo que sé hacer bien es por ti, y cuando llega la recompensa por un esfuerzo no puedo dejar de recordar en tus palabras “échale ganas”. Que esta sea una de las recompensas a tantos años de entrega, desvelos, apoyo: Gracias por darme la oportunidad de hacer realidad este sueño compartido Mami Te quiero con todo mi corazón.

A mi Padre: Detrás de este logro estás tú, gracias por tu apoyo, confianza y cariño. Nada podría ser mejor: Gracias por darme la oportunidad de hacer realidad este sueño compartido Papi Te quiero con todo mi corazón.

A mi hermano: Gracias Beto por tu cariño, por tu apoyo y tus consejos que me han servido para formarme como persona te quiero mucho.

A mi *alma mater* el Instituto Politécnico Nacional y a la Sección de Estudios de Posgrado e investigación por darme la oportunidad de alcanzar esta meta, gracias a los profesores e investigadores en especial a M. En C. Ricardo Contreras Contreras, Dr. Jorge Meléndez Estrada, M. en C. Javier Ávila, M en I. Felipe López Sánchez por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo por dar lo mejor para mi formación como Maestro en Ingeniería Civil.

INDICE

Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción.....	13
Justificación.....	15
Objetivo general.....	16
Objetivos particulares.....	16
Hipótesis.....	16

CAPITULO I: ANTECEDENTES

1.1 El agua en México.....	17
1.2 Aguas Subterráneas.....	17
1.2.1 Calidad del agua subterránea.....	17
1.2.2 El agua subterránea en México.....	19
1.3 Electroquímica o electrolisis.....	22
1.3.1 Celdas Electroquímicas.....	23
1.3.2 Corrosión.....	23

**CAPITULO II: IDENTIFICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y
UBICACIÓN DE LOS POZOS EN ESTUDIO**

2.1 Municipio de San Salvador.....	25
2.2 Ubicación geográfica de los pozos.....	30

CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE

3.1 Tratamiento Electroquímico de aguas residuales.....	39
3.2 Comisión Estatal de Agua, Hidalgo.....	42

CAPITULO IV: ARSÉNICO Y TOXICIDAD

4.1 Generalidades.....	44
4.2 Metales tóxicos en el medio ambiente.....	46
4.3 Arsénico.....	47

4.4 Distribución en la Naturaleza del Arsénico.....	49
4.5 Rutas de exposición del Arsénico.....	51
4.6 Riesgo de sufrir exposición al Arsénico.....	54
4.7 Normas y regulaciones para la exposición al Arsénico.....	56
4.8 Destino biológico del arsénico en el cuerpo.....	57
4.9 Cambios patogénicos inducidos por el Arsénico	60
4.10 Efectos fisiológicos de la exposición al Arsénico.....	61
4.11 Evaluación clínica.....	70

CAPITULO V: FUENTES DE CONTAMINACIÓN

5.1 Tipos de Contaminación.....	76
5.2 Industria minera.....	79
5.3 Depositación atmosférica.....	79
5.4 Movilización de metales.....	80
5.5 Métodos de análisis de metales.....	80

CAPITULO VI: METODOLOGIA

6.1 Descripción de la metodología.....	84
6.2 Diagrama de flujo de la metodología.....	85

CAPITULO VII: EXPERIMENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Experimentación.....	86
7.2 Experimentación de la primera visita hecha el sábado 5/02/2011.....	88
7.3 Experimentación de la segunda visita hecha el sábado 14/05/2011.....	89
7.4 Experimentación de la tercera visita hecha el sábado 6/09/2011.....	90
7.5 Experimentación de la cuarta visita hecha el sábado 14/01/2012.....	91

CONCLUSIONES	93
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	94
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	95
---------------------------	----

INDICE DE TABLAS

Tabla.1 Principales localidades de San Salvador las cuales en la tabla se muestra población Femenina, Masculina y la total por localidad (MEH, IHDEC 1993).....29

Tabla.2 Ficha técnica de fuente de abastecimiento en pozo de Santa María A. (MEH, IHDEC 1993).....31

Tabla.3 Ficha técnica del equipo de bombeo en pozo profundo de Santa María Amajac (MEH, IHDEC 1993).....31

Tabla.4 Ficha técnica de las piezas especiales y accesorios en la descarga o tren de descarga del pozo de de Santa María Amajac (MEH, IHDEC 1993).....32

Tabla.5 Ficha técnica de fuente de abastecimiento en pozo profundo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).....34

Tabla.6 Ficha técnica del equipo de bombeo en pozo profundo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).....34

Tabla.7 Ficha técnica de las piezas especiales y accesorios en la descarga o tren de descarga del pozo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).....35

Tabla.8 Sustancias química de uso cotidiano (EPA y OMS, 1980).....44

Tabla.9 Sustancias comunes en el ambiente y sus efectos en el ser humano (EPA y OMS, 1980).....47

Tabla.10 Propiedades Electrónicas y Físicas del Arsénico (ATSDR, 2007).....48

Tabla.11 Fuente de arsénico vs. Contaminación ambiental potencial (ATSDR, 2007).....51

Tabla.12 Países en los que se han reportado contaminación de agua de pozos por arsénico debido a fuentes naturales (NRC, 2000).....52

Tabla.13 Tabla.13 Límites permisibles de características microbiológicas modificadas (NOM-127-SSA1-1994).....56

Tabla 14 Límites permisibles de características Físicas y organolépticas (NOM-127-SSA1-1994).....57

Tabla 15 Los límites Permisibles de algunos metales que se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos (NOM-127-SSA1-1994).....57

Tabla 16 El arsénico inorgánico es un carcinógeno humano (IARC, 2004).....68

Tabla 17 Tipos de contaminación Biológico, Físicos y Químicos(PROFEPA, 2002).....76

Tabla 18 Coagulantes químicos más utilizados en el tratamiento de coagulación-floculación (Metcalf y Eddy, 1991).....81

Tabla 19 Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo uno del 5/02/2011.....88

Tabla 20. Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo uno del 14/05/2011.....89

Tabla 21. Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo dos del 15/05/2011 después del Método de Electroquímica.....90

Tabla 22. Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo uno del 8/08/2011.....91

Tabla 23. Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo dos del 9/08/2011 después del Método de Electroquímica.....91

Tabla 24. Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo uno del 14/01/2012.....92

Tabla 25 Resultado del Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. de las concentraciones de As del muestreo dos del 16/01/2012 después del Método de Electroquímica.....92

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 El sistema de agua subterránea en condiciones naturales se recarga debido a la precipitación pluvial y el agua fluye hacia los arroyos a través de este sistema (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).....20

Fig. 2 El bombeo del sistema subterráneo causa que la capa freática baje de nivel y cambie la dirección de la corriente del agua subterránea. Parte del agua que fluía hacia un arroyo, ya no lo hace y así mismo, algo de esta corriente también es acarreada desde el arroyo hasta el sistema de agua subterránea, reduciendo por lo tanto la corriente del arroyo (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).....20

Fig. 3 Los contaminantes que se introducen en la superficie de la tierra pueden infiltrarse a la capa freática y fluir hacia un punto de descarga, ya sea un pozo o un arroyo (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).....21

Fig. 4 Los declives del agua pueden afectar el ambiente natural de las plantas y animales. Las plantas en las áreas ribereñas que crecen por la proximidad de la capa freática a la superficie, podrían no sobrevivir si el agua aumentara su profundidad (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).....21

Fig. 5 Explicación grafica de las partes de la electroquímica (Chang, Raymond 2007).....22

Fig. 6 Escudo del municipio de San Salvador (<http://campohidalguense.gob.mx/sansalvador/>).....25

Fig. 7 Localización del municipio de San Salvador, en el mapa del estado de Hidalgo (<http://campohidalguense.gob.mx/sansalvador/>).....26

Fig. 8 Croquis de localización del pozo de Santa María Amajac (INEGI, 2012).....30

Fig. 9 Visita al cuarto de controles y vigilancia así como al equipo de medición.....32

Fig. 10 Detalle del tren de piezas especiales a la salida del equipo de bombeo.....32

Fig. 11 Croquis de localización del pozo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (INEGI, 2012).....33

Fig. 12 Vista al cuarto de controles y vigilancia así como al equipo de medición.....	35
Fig. 13. Detalle del equipo de bombeo existente, con motor eléctrico externo acoplado a bomba de tipo vertical.....	35
Fig. 14 Croquis de localización del pozo de Santa María Amajac (INEGI, 2012).....	36
Fig. 15 Detalle del equipo de bombeo existente, con motor eléctrico externo.....	37
Fig. 16 Planta Potabilizadora a base de filtros.....	37
Fig.17 Vista al cuarto de controles y vigilancia así como tanque de almacenamiento.....	37
Fig. 18 Tanques de almacenamiento y cárcamo de bombeo.....	37
Fig.19 1 Pozo El Pacheco, 2 Alimentación al tanque, 3 Tanque de almacenamiento de 10m ³ , 4 Sistema de oxidación con descarga por gravedad al tanque, 5 Almacenamiento de Hipoclorito de Calcio, 6 Caja de operación de válvulas, 7 Bomba de 5 H.P., 8 Sistemas de filtración, 9 Bomba de 1/2 H.P., 10 Tanque de almacenamiento de Agua tratada de 10m ³ ., 11Bomba de 7 H.P., 12 línea de conducción por bombeo, 13Subestacion y transformador, 14Caseta de controles (MEH, IHDEC 1993).....	38
Fig. 20 Ficha técnica de muestreo del pozo Santa María Amajac (CEAyAH, 2008).....	43
Fig. 21 Ficha técnica de muestreo del pozo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (CEAyAH, 2008).....	43
Fig.22 Ilustración de la neuropatía periférica predominante sensitiva que se denomina guante y calcetín(ATSDR 2007).....	64
Fig.23 Queratosis por arsénico en las palmas de las manos de un paciente que consumió agua contaminada por un largo periodo (Fotografía cortesía del Dr. Joseph Graziano, 2007).....	65
Fig.24 El paciente de la fotografía desarrolló una hiperpigmentación severa posterior a la ingesta prolongada de agua contaminada con arsénico (ATSDR, 2007).....	66
Fig.25 Cáncer de piel en la palma de un paciente que ingirió agua contaminada con arsénico de un pozo por un largo periodo (ATSDR, 2007).....	67
Fig. 26 Diagrama de flujo de la metodología realizada.....	85
Fig.27 Se pesaron las placas de acero en báscula electrónica.....	86
Fig.28 Se lavo el material de laboratorio.....	86
Fig.29 Se lavo el material de laboratorio.....	87
Fig.30 Se desinfecto el material de laboratorio con ayuda de una autoclave.....	87
Fig.31 Se procedió a sacar el material de laboratorio desinfectado para su colocación.....	87
Fig.32 Se instala el material de laboratorio para el método de Electroquímica.....	87
Fig.33 Se vacían las muestras en el vaso y se gradúan con ayuda de una pipeta.....	87

Fig.34 Se observa el método y se toman anotaciones de su funcionamiento.....87

Fig.35 Se muestra en la imagen la reacción que se está formando en el cátodo y ánodo.....88

Fig.36 El método funciona correctamente.....88

RESUMEN

El presente trabajo de tesis de maestría tiene por objetivo explicar como se elimina el Arsénico de la captación de aguas subterráneas de los tres pozos en estudio los cuales llevan el nombre de Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia Gutiérrez y Pacheco ubicados en la localidad de San Salvador en el Municipio del San Salvador en el estado de Hidalgo.

La metodología utilizada para el desarrollo del trabajo de investigación consistió en lo siguiente; la identificación y 2 muestreos por pozo llegando a 6 muestras por visita según la NOM-014-SSA1-1993, 3 muestras son llevadas a un laboratorio particular (Tecno Ambiental S.A. de C.V.) donde son analizadas por el método de Absorción Atómica para determinar en grado de contaminación de Arsénico, las muestras faltantes son llevadas a Laboratorio de Sanitaria de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura unidad Zacatenco en donde se sometieron al proceso de Electroquímica. Una vez acabado el proceso son llevadas al laboratorio particular donde igualmente son sometidas al método de Absorción Atómica para determinar su grado de contaminación de Arsénico.

Los resultados de las primeras 3 pruebas son comparados con las 3 pruebas que llevaron el proceso de Electroquímica mostrando una remoción considerable de Arsénico a <0.0025 mg/l que es el Límite de Detección del Método de Absorción Atómica que está dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su potabilización"

ABSTRACT

This master's thesis aims to explain how arsenic is removed from the extraction of groundwater wells in the three study which bear the name of Santa Maria Amajac, Adelaido Azpeitia Pacheco Gutierrez and located in the town of San Salvador in the municipality of San Salvador in the state of Hidalgo.

The methodology used for the development of the research consisted of the following: the identification and 2 samples per well reaching 6 samples per visit according to NOM-014-SSA1-1993, 3 samples are taken to a private laboratory (Tecno Ambiental SA de CV) which are analyzed by atomic absorption method to determine the extent of arsenic contamination, missing samples are taken to Health Laboratory of the School of Engineering and Architecture where Zacatenco unit underwent the electrochemical process. Once finished the process are taken to the laboratory where they also are particularly subject to methodological of atomic absorption to determine the degree of contamination of arsenic.

The results of the first 3 tests are compared with the 3 tests that led the process of Electrochemistry showing a significant removal of arsenic to <0.0025 mg / l which is the Method Detection Limit Atomic Absorption which is within the Mexican Official Standard NOM-127-SSA1-1994, "Environmental Health, Water for human use and consumption- Permissible Limits of Quality and treatments that must be applied for purification Water"

INTRODUCCION

El agua subterránea es de suma importancia como recurso vital, la cual es suministrada por diferentes medios a la mayoría de las zonas de las diferentes ciudades en todo el mundo. Sin embargo, esta situación está cambiando rápidamente, ya que muchas áreas urbanas y semiurbanas se caracterizan por su rápida expansión, debido al crecimiento poblacional y desarrollo económico. Se forman nuevos patrones de uso de la tierra, lo que conlleva conflictos entre el desarrollo y la conservación. Una vez que se ha contaminado una fuente de agua subterránea, es difícil y costoso remediar la situación, si es que hay una posibilidad.

A largo plazo la contaminación y / o agotamiento de los recursos de aguas subterráneas puede golpear el crecimiento económico y empeorar las condiciones de vida en las ciudades, las áreas urbanas en los países en vías de desarrollo que dependen del agua subterránea, se encuentran en una situación particularmente vulnerable. Las aguas subterráneas cumplen un papel importante para el suministro de agua potable en áreas urbanas y rurales como el caso del Valle del Mezquital en sus diferentes municipios como es el caso de San Salvador en el Edo. De Hidalgo.

Además, el abastecimiento a las grandes zonas urbanas representa gran interés para las autoridades como es el caso de la Ciudad de México, por el aumento de la población, éste acontecimiento es preocupante, tanto para las autoridades federales como estatales, es por ello que se han estudiado varias opciones del suministro. Con el propósito de brindar mejor calidad de agua y cubrir las demandas futuras del recurso vital, esta investigación presenta una alternativa no convencional y viable para la remediación y el suministro de agua potable por medio del proceso de Electroquímica en tres pozos del municipio de San Salvador los cuales son: Pozo Santa Maria Amajac, Pozo Adelaido Azpeitia G. y Pozo Pacheco. El agua es el recurso que presenta mayores restricciones de desarrollo social y económico del hombre su escasez y contaminación amenazan aspectos fundamentales de la salud pública.

En el capítulo I se habla de la importancia del agua en México, que es un país semiárido y de los porcentajes de lluvia en las diferentes regiones del país, así como las características del agua subterránea en condiciones normales, su calidad y efectos ambientales por la sustracción de la misma, se explicara el método de Electroquímica su funcionamiento, su composición y por qué se da la corrosión. En el capítulo II se ve la ubicación del municipio del San Salvador su medio físico, reseña histórica, perfil socio demográfico, infraestructura social y de comunicaciones, sus principales localidades y la ubicación de cada pozo, Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia Gutiérrez y pozo Pacheco en su municipio correspondiente, con fichas técnicas donde se ve la profundidad de cada pozo, el gasto de sustracción, la capacidad de la bomba etc.

En el capítulo III se ve el diagrama de flujo de la metodología a seguir en el experimento de la electroquímica. En el capítulo IV se ve las generalidades de la toxicidad y metales tóxicos en el medio ambiente, todo lo referente al Arsénico (As) como y donde se encuentra, sus rutas de exposición, las normas que lo regulan, sus efectos fisiológicos como: gastrointestinales, hepáticos, renales, cardiovasculares, dérmicos, respiratorios, reproductivos etc. Sus efectos cancerígenos en la piel y en el pulmón así como su evaluación clínica. En el capítulo V se ve las fuentes de contaminación como son la Biológica, la física, el origen de la contaminación Química en la industria minera y movilización de metales.

En el capítulo VI se ve lo que conocemos como la frontera del conocimiento en particular “Arsénico en el agua subterránea de la Comarca Lagunera” proyecto de la Universidad Iberoamericana de Torreón por Ricardo Ramírez Vargas donde el autor propone una alternativa de eliminación de arsénico en la lagua. En el capítulo VII se ve, el equipo utilizado para la experimentación, el proceso de la experimentación y los resultados dados por Laboratorio Tecnoambiental.

JUSTIFICACIÓN

Las fuentes de contaminación han descargado una amplia variedad de sustancias químicas y biológicas al agua subterránea. Los contaminantes químicos incluyen sustancias inorgánicas, radioactivas y orgánicas. Los contaminantes inorgánicos que se detectan comúnmente son; nitrato, sulfato, cloro, hierro y manganeso, los cuales seguido ocurren de manera natural a un nivel de fondo. Las concentraciones en exceso se originan de muchas fuentes, especialmente residenciales y sistemas de drenaje de la ciudad, minas y una variedad de industrias. Se han detectado en plumas de contaminación de minas, molinos e industrias de electrochapeado de metal cianuro y los metales arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, selenio, vanadio y zinc.

Este proyecto de investigación es importante ya que el proceso de Electroquímica se ha manejado mas al tratamiento de aguas residuales el cual está adquiriendo importancia por su versatilidad, reducido tamaño y capacidad de automatización. Fue utilizada por primera vez en Inglaterra en 1889, La utilización de procesos electrolíticos en la recuperación de metales fue patentada por Elmore en 1904. Dado al relativo alto costo de las instalaciones y el alto consumo en energía eléctrica estas tecnologías no tuvieron una buena aceptación en esa época, no obstante distintos países como Estados unido o la antigua Unión soviética continuaron con las investigaciones durante los siguientes años lo que permitió acumular una gran experiencia y conocimiento sobre estos procesos.

Este proyecto de investigación se propone para la eliminación de Arsénico en la captación de aguas subterráneas para consumo humano, en localidades del municipio de San Salvador en el estado de Hidalgo llegando a una remoción de un 90% aproximadamente en cada uno de los pozos en estudio los cuales son: Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia Gutiérrez y Pacheco.

OBJETIVO GENERAL

- Remover el Arsénico en muestras de agua en el laboratorio por el proceso de Electroquímica, de la captación de agua subterránea en los pozos Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia Gutiérrez y Pacheco en el municipio de San Salvador, estado de Hidalgo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer el proceso de electroquímica como una viabilidad técnica para la remoción del Arsénico.
- Saber si realmente es eficiente el proceso de Electroquímica para la remoción del Arsénico.

HIPOTESIS

El proceso de electroquímica es una alternativa técnica viable para la remoción del Arsénico en aguas subterráneas de San Salvador, Hidalgo.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

1.1 El agua en México

México es un país semiárido (56%). El 67% de las lluvias mexicanas cae en los meses de junio a septiembre. En promedio, el país recibe unos 711 mm de lluvia cada año (1 mm de lluvia = 1 litro por m²). No es mucho comparado con otros países. En el norte, México es muy ancho pero con poca lluvia (árido o semiárido); en el sur es angosto, pero llueve más. El 50% de la superficie la tienen los estados norteros, y ahí llueve tan sólo 25% del total. En la parte angosta del país, que ocupa 27.5% del territorio, cae la mayor parte del agua de lluvia (49.6%), esto es en los estados del sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco). Entre los estados más secos está Baja California: tan sólo llueve un promedio de 199 mm por año. En contraste está Tabasco, que recibe 2588 mm de agua cada año. En México llueve cada vez menos. De 1994 a la fecha ha llovido menos del promedio histórico anterior (Semarnat, CNA. Editado en Agua.org.mx.2007).

1.2 Aguas Subterráneas

1.2.1 Calidad del agua subterránea

Debido a que el agua subterránea se mueve a través de las rocas y la tierra del subsuelo, puede fácilmente disolver sustancias durante este movimiento. Por dicha razón, el agua subterránea muy frecuentemente puede contener más sustancias que las halladas en el agua superficial.

La contaminación del agua puede definirse como la modificación de las propiedades físicas, químicas o biológicas que restringen su uso. Las sustancias que modifican la calidad del agua de los acuíferos se dividen en: las presentes en la naturaleza antropogénicas. Dentro de las primeras se encuentran: arsénico, flúor y elementos radiactivos, entre otros (Nielsen, 1991); mientras que en las segundas se incluyen

bacterias, virus, nitratos, orgánicos, sintéticos e hidrocarburos (solventes, pesticidas, etc.) y materiales pesados. Las fuentes de contaminación se pueden originar en la superficie del terreno, por ejemplo, la agricultura; en el subsuelo por arriba del nivel freático, por ejemplo, basureros a cielo abierto; y en el subsuelo por debajo del nivel freático, como es el caso de pozos abandonados (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2007).

Ventajas del agua subterránea

1. Según estimaciones, el 95% o más del agua dulce utilizable se encuentra bajo la superficie del terreno.
2. Es el único recurso disponible en zonas desérticas.
3. Hay menores pérdidas por evaporación.
4. Hay menor exposición a la contaminación.
5. Su disponibilidad es menos afectada por las variaciones climáticas.
6. Su distribución es más amplia en el área.
7. No hay pérdida de la capacidad de almacenamiento.
8. La temperatura del agua es constante.
9. Su composición química es casi constante.
10. No tiene turbiedad ni color.
11. No necesita purificación, por no existir organismos patógenos.

Desventajas del agua subterránea

1. No es visible, por lo tanto se dificultan su estudio, cuantificación, explotación racional y manejo.
2. En muchas regiones las rocas no contienen suficiente porosidad o permeabilidad para proporcionar la cantidad de agua requerida.
3. En algunas zonas tiene mayor contenido de sólidos disueltos que el agua superficial, en la misma región.
4. Falta mucho personal capacitado, a todos los niveles y falta de datos.

1.2.2 El agua subterránea en México

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se les extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así, el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados.

La unidad básica para el manejo del agua es la cuenca hidrológica, en la cual se considera la forma en que escurre el agua en la superficie (cuencas hidrográficas) y en el subsuelo (acuíferos). Con esta base, se integraron las trece regiones hidrológico-administrativas en que se organiza el país para fines de administración del agua.

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país se divide en 653 acuíferos o unidades hidrogeológicas, conforme a lo publicado en el *Diario Oficial de la Federación*, el 5 de diciembre de 2001.

La importancia del agua subterránea queda de manifiesto al considerar que el 70% del volumen que se suministra a la población, el 33% del que se destina a la agricultura y el 62% del que utiliza la industria tienen ese origen (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).

El sistema de agua subterránea en condiciones naturales, el declive de los niveles de agua, la calidad y los efectos ambientales del desarrollo del agua subterránea se explican en las figuras 1 a la 4.

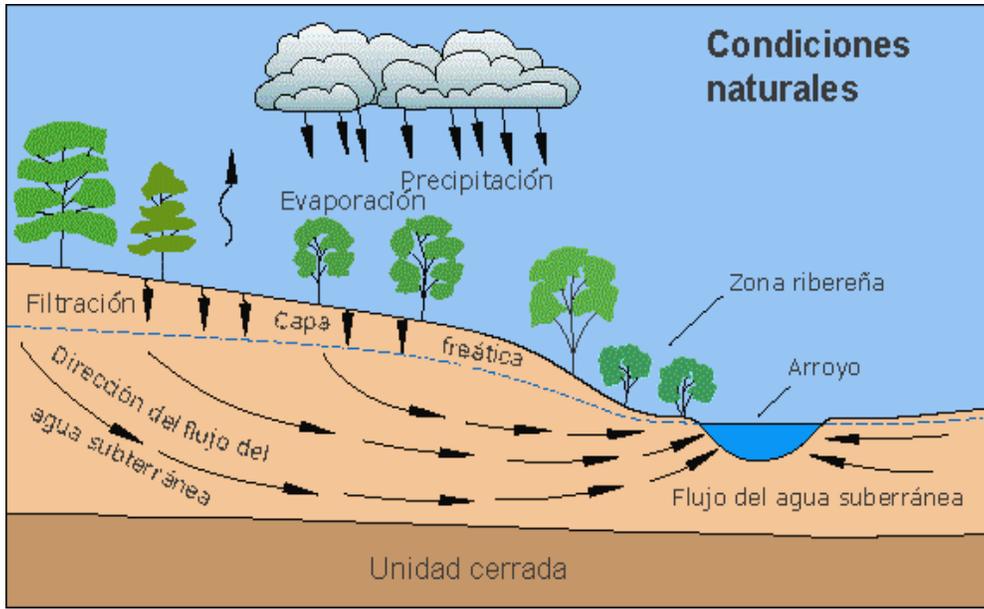


Fig. 1 El sistema de agua subterránea en condiciones naturales se recarga debido a la precipitación pluvial y el agua fluye hacia los arroyos a través de este sistema (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).

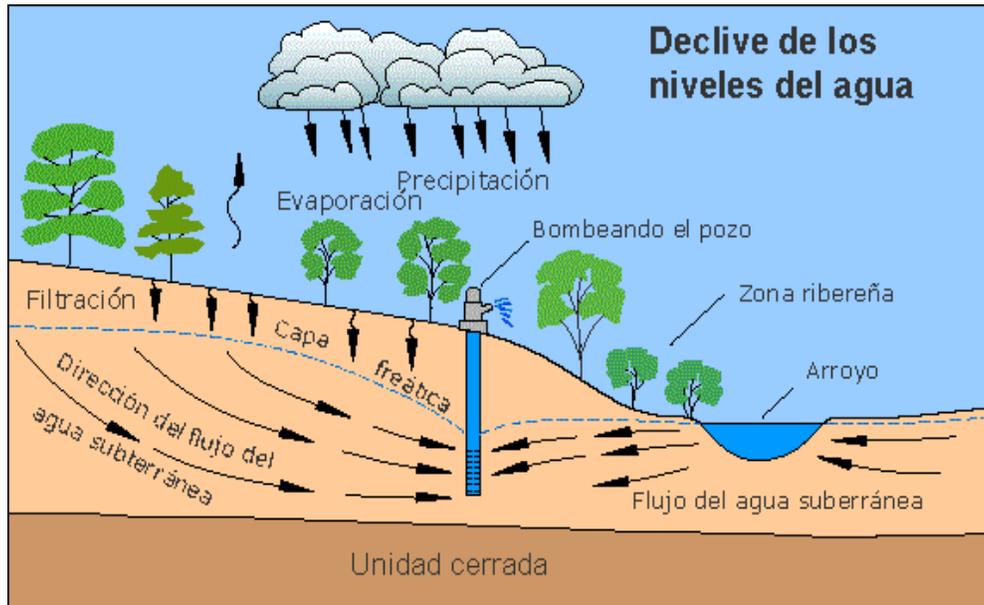


Fig. 2 El bombeo del sistema subterráneo causa que la capa freática baje de nivel y cambie la dirección de la corriente del agua subterránea. Parte del agua que fluía hacia un arroyo, ya no lo hace y así mismo, algo de esta corriente también es acarreada desde el arroyo hasta el sistema de agua subterránea, reduciendo por lo tanto la corriente del arroyo (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).



Fig. 3 Los contaminantes que se introducen en la superficie de la tierra pueden infiltrarse a la capa freática y fluir hacia un punto de descarga, ya sea un pozo o un arroyo (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).

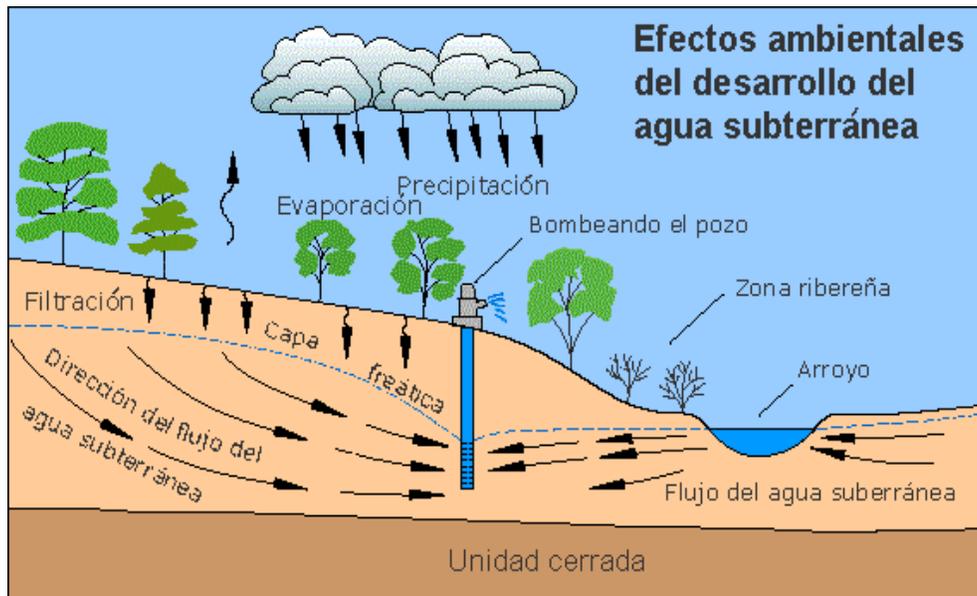


Fig. 4 Los declives del agua pueden afectar el ambiente natural de las plantas y animales. Las plantas en las áreas ribereñas que crecen por la proximidad de la capa freática a la superficie, podrían no sobrevivir si el agua aumentara su profundidad (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).

1.3 Electroquímica o electrolisis.

La electrólisis es un método de separación de los elementos que forman un compuesto aplicando electricidad: se produce en primer lugar la descomposición en iones, seguido de diversos efectos o reacciones secundarias según los casos concretos.

El proceso electrolítico consiste en lo siguiente. Se disuelve una sustancia en un determinado disolvente, con el fin de que los iones que constituyen dicha sustancia estén presentes en la disolución. Posteriormente se aplica una corriente eléctrica a un par de electrodos conductores colocados en la disolución. El electrodo cargado negativamente se conoce como cátodo, y el cargado positivamente como ánodo. Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones positivos, o cationes, son atraídos al cátodo, mientras que los iones negativos, o aniones, se desplazan hacia el ánodo. La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente de poder eléctrica que mantiene la diferencia de potencial en los electrodos (Figura 5).

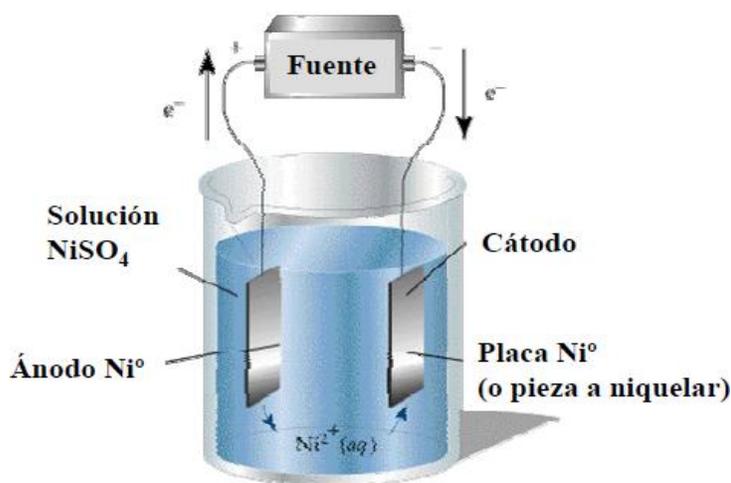


Fig. 5 Explicación gráfica de las partes de la electroquímica (Chang, 2007).

En los electrodos, los electrones son absorbidos o emitidos por los iones, formando concentraciones de los elementos o compuestos deseados (Chang, 2007).

1.3.1 Celdas Electroquímicas

La Celda Electroquímica es el dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos. También se conoce como celda galvánica o voltaica, en honor de los científicos Luigi Galvani y Alessandro Volta, quienes fabricaron las primeras de este tipo a fines del Siglo XVIII.

Las celdas electroquímicas tienen dos electrodos: El Ánodo y el Cátodo. El ánodo se define como el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación y el cátodo donde se efectúa la reducción. Los electrodos pueden ser de cualquier material que sea un conductor eléctrico, como metales, semiconductores. También se usa mucho el grafito debido a su conductividad y a su bajo costo. Para completar el circuito eléctrico, las disoluciones se conectan mediante un conductor por el que pasan los cationes y aniones, conocido como puente de sal (o como puente salino). Los cationes disueltos se mueven hacia el Cátodo y los aniones hacia el Ánodo. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo por que existe una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos (García, 2008).

1.3.2 Corrosión

La corrosión de los metales es un fenómeno natural que ocurre debido a la inestabilidad termodinámica de la mayoría de los metales. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico) los metales están presentes en la Tierra en forma de óxido, en los minerales (como la bauxita si es aluminio, la hematita si es hierro). Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en reducir los óxidos en bajos hornos, luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido.

La corrosión es definida como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general puede entenderse como

la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos.

La corrosión puede ser mediante una reacción química (redox) en la que intervienen dos factores:

- La pieza manufacturada (la concepción de la pieza: forma, tratamiento, montaje).
- El ambiente (por ejemplo, un ambiente cerrado es menos propenso a la corrosión que un ambiente abierto).

O por medio de una reacción electroquímica

Los más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón) (Naveira, 2008).

CAPITULO II: IDENTIFICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y UBICACIÓN LOS POZOS EN ESTUDIO

2.1 Municipio de San Salvador

Nomenclatura

San Salvador: Esta población comenzó a formarse con la llegada de los otomíes hacia el año 640 de nuestra era, sin embargo, no se le conoce un nombre otomí al lugar, el nombre que hoy se le atribuye al municipio, le fue asignado por los españoles en la época de la Conquista. Glifo (Figura 6).

ESCUDO

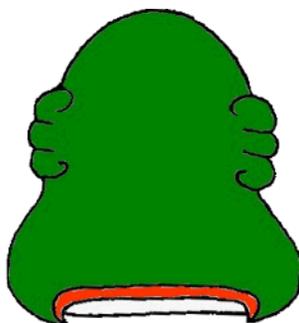


Fig. 6 Escudo del municipio de San Salvador (<http://campohidalguense.gob.mx/sansalvador/>)

Reseña histórica: La historia de San Salvador se inicia con la llegada de los otomíes hacia el año 674, más tarde en 1117, hacen su arribo las primeras tribus Chichimecas, que consuman la conquista de estos lugares en 1120. Pocos datos se tienen sobre el origen de San Salvador, aunque lo más seguro es que naciera como una de tantas rancherías hacia la segunda mitad del siglo XVI sin tener una historia propia. Para principios del siglo XVIII, era una importante república de indios sujeta sucesivamente a Mixquiahuala, Tepatepec y finalmente a Actopan. Por mucho tiempo se pensó que su nacimiento procedía del año 1920 al promulgarse la Constitución del Estado de Hidalgo, sin embargo la lista de presidentes municipales que se conserva inicia en el año de 1870 (MEH, IHDEC 1993).

Medio Físico

Localización: El municipio de San Salvador se encuentra a 10 km. de la ciudad de Actopan y pertenece a este Distrito, situado en el Valle del Mezquital a 20°17'0" de latitud norte, 99°00'55" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich a una altura sobre el nivel del mar de 1960 metros. El municipio colinda al norte con los municipios de Ixmiquilpan y Santiago de Anaya; al este con el municipio de Actopan; al sur con los municipios de Ajacuba y Francisco I. Madero; al oeste con los municipios de Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón y Chilcuautla (Figura 7).



Fig. 7 Localización del municipio de San Salvador, en el mapa del estado de Hidalgo (54)

(<http://campohidalguense.gob.mx/sansalvador/>).cuadro)

Extensión: El municipio de San Salvador cuenta con una extensión territorial de 200.4 Km. y representa el 0.95% de la superficie del Estado.

Orografía: San Salvador está ubicado en la provincia del Eje Neovolcánico en un 90% de la superficie, formado por llanuras y lomeríos en menor proporción y un 10% localizado en la Sierra Madre Oriental, de las principales elevaciones presentes en el municipio se encuentran los cerros de: San Miguel, Peña Colorada, Corazón, Cumbre, La Palma, La Corona, Colorado, El Punteagudo etc. todos ellos por encima de los 2300 metros sobre el nivel del mar.

Hidrografía: En lo que respecta a la hidrografía del municipio San Salvador se encuentra posicionado en la región del Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma, de la cual derivan dos subcuencas: el río Tula que cubre el 12.55% de la superficie municipal y el río Actopan que riega el 87.45% restante. Las corrientes de agua que conforman el municipio son: Requena, Xiotho, El Capulín, El Norte, Alto Requena, Rinconada, El Potrero, La Estancia y Chicanaxco.

Clima: El municipio en toda su superficie municipal presenta un clima templado-semifrío con una temperatura media anual de 17°C y una precipitación total anual de 475 mm.

Principales Ecosistemas

Flora: La flora en el municipio tiene una vegetación compuesta por encino, oyamel, nopal, cardón, garambullo, pitaya, mezquite, pirul, huizache, fresno y encino

Fauna: La fauna perteneciente a ésta región está compuesta por liebre, conejo, codorniz, tórtola, torcaza, víbora de cascabel, puerco, escorpión, camaleón, ciempiés, alacrán, tarántula, avispa, pinacate, mariposa, mayate, etc. (MEH, IHDEC 1993).

Perfil Socio Demográfico

Grupos Étnicos: De acuerdo a los resultados que presento el II Censo de Población y Vivienda en el 2005, en el municipio habitan un total de 5,257 personas que hablan alguna lengua indígena.

Evolución Demográfica: De acuerdo a los resultados que presento el II Censo de Población y Vivienda en el 2005, el municipio cuenta con un total de 28,637 habitantes (MEH, IHDEC 1993).

Infraestructura Social y de Comunicaciones

Educación: La infraestructura educativa en el municipio de San Salvador es amplia en preescolar, cuenta con 39 planteles, y a nivel primaria en 39 planteles, a nivel secundaria nueve planteles; a nivel bachillerato en dos planteles, registrando además cuatro bibliotecas públicas.

Salud: El ayuntamiento de San Salvador registra 377 derechohabientes, todos atendidos por las siguientes instituciones: El Instituto Mexicano del Seguro Social, a través de 11 unidades médicas, 2 IMSS – SOLIDARIDAD, así como 9 casas de salud también del sector salud.

Vivienda: Los resultados que presento el II Censo de Población y Vivienda en el 2005, en el municipio cuentan con un total de 6,536 viviendas de las cuales 6,489 son particulares.

Servicios Públicos: San Salvador cuenta con agua potable, con 7 sistemas cubriendo 4,356 tomas domiciliarias y 33 localidades con red de distribución; drenaje y alcantarillado con 13 cuerpos de recepción, por lo que 13 localidades cuentan con este servicio; y electricidad, proporcionada por CFE (Comisión Federal de Electricidad), con 5,182 tomas instaladas, siendo necesario incrementarlas y mejorar su calidad.

Medios de Comunicación: Los principales vehículos que transitan por ésta carretera son automóviles particulares, camiones de carga y de pasajeros. Con respecto a las telecomunicaciones, tiene los servicios de teléfonos en veinte localidades y 11 oficinas postales.

Vías de Comunicación: Cuenta con una infraestructura de 12. Km. de carretera federal troncal y 4 Km. de alimentadoras estatales que tienen como propósito principal servir de acceso a las carreteras troncales (MEH, IHDEC 1993).

Gobierno

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) llevó a cabo el conteo de población en el 2010 en el estado de Hidalgo y donde el municipio de San Salvador cuenta con un número total de población de 18684 (Tabla 1).

Tabla 1. Principales localidades de San Salvador las cuales en la tabla se muestra población Femenina, Masculina y la total por localidad (MEH, IHDEC 1993).

NOMBRE DE LA LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN MASCULINA	POBLACIÓN FEMENINA
SAN ANTONIO ZARAGOZA	2,865	1,409	1,456
CAXUXI	2,459	1,168	1,291
SAN SALVADOR	1,502	712	790
LAGUNILLA	1,468	678	790
DEXTHO DE VICTORIA	1,349	658	691
SANTA MARIA AMAJAC	1,309	622	687
POXINDEJE DE MORELOS	1,026	487	539
TEOFANI	1,012	493	519
OLVERA EL	975	504	471
DEMACU	889	406	483
CAÑADA GRANDE	886	438	448
COLORADO EL	780	362	418
PUERTO LAZARO CARDENAS EL	748	377	371
TOTHIE	714	334	380
XUCHITLAN	702	359	343

2.2 Ubicación geográfica de los pozos

- Ubicación y características del pozo Santa María Amajac

La ubicación del pozo Santa María Amajac se encuentra en la localidad con el mismo nombre en latitud norte $20^{\circ}13'00''$ y longitud oeste de $99^{\circ}00'45''$ en el municipio de San Salvador en el estado de Hidalgo (Figura 8).

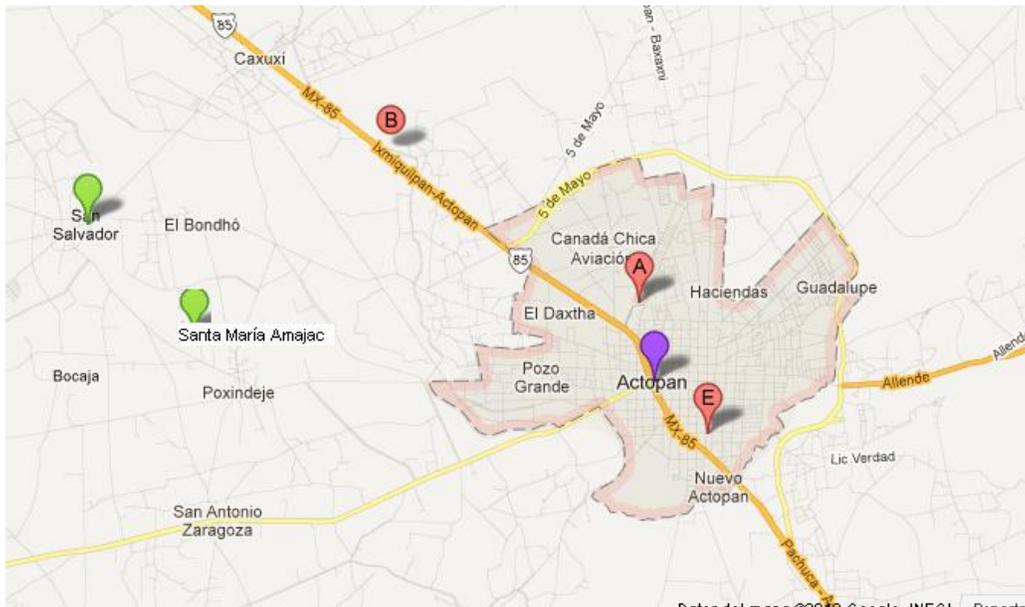


Fig. 8 Croquis de localización del pozo de Santa María Amajac (INEGI, 2012).

Las características del equipo de bombeo actualmente instalado en el pozo Santa María Amajac fueron proporcionados por la Arq. Isabel López Avendaño responsable del servicio de agua potable, fue instalado el 05 de Marzo del 2006, con parámetros de selección de gasto $(Q)=55.55$ l.p.s. y carga dinámica total $(CDT)= 80.00$ m., y al remitirse a las respectivas curvas de operación para estos parámetros, se obtiene la siguientes información técnica como se muestra en las tablas 2 y 3 (MEH, IHDEC 1993).

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

Tabla 2. Ficha técnica de fuente de abastecimiento en pozo de Santa María A. (MEH, IHDEC 1993).

FICHA TECNICA DE FUENTE DE ABASTECIMIENTO EN POZO PROFUNDO						
ESTADO DE HIDALGO		MUNICIPIO: SAN SALVADOR		ORGANISMO OPERADOR: COMISIÓN ESTATAL DE AGUA Y ALCANTARILLADO		
TIPO DE FUENTE:		POZO PROFUNDO		NOMBRE Y NÚMERO DE APROVECHAMIENTO: SANTA MARIA AMAJAC		
RESPONSABILIDAD DE LA FUENTE: MUNICIPIO DE SAN SALVADOR				DEPENDENCIA: DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO		
LOCALIZACION						
UBICACIÓN:		LOCALIDAD, COMUNIDAD, COLONIA, BARRIO:			SANTA MARIA AMAJAC	
CALLES ALEDAÑAS (AREAS DE REFERENCIA):					ALTITUD:	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:		LATITUD NORTE		20°13'00''	LONGITUD OESTE: 99°00'45''	
TITULOS DE CONCESIÓN					NÚMERO:	
VOLUMENES DE EXPLOTACIÓN AUTORIZADO m ³ /Año				GASTO AN L.P.S.:	AÑOS:	
ACUIFERO:						
REGIÓN HIDROLÓGICA:		26	CUENCA HIDROLÓGICA		RIO TULA	ACUÍFERO: 1313ACTOPAN SANTIAGO DE ANAYA
CONSTRUCCION FUENTE DE ABASTECIMIENTO						
FECHA DE PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD TOTLA EN M.	DIÁMETRO (PULG) DE		LONGUITUD DE ADEME EN M.		A). CARECE DE INFORMACION
		PERFORACION	ADEME	LISO	RANURADO	B). INFORMACION NO CONGRUENTE
A).	200	19"	12"	28.3	28.3	
AFORO INICIAL						
FECHA DE AFORO		NIVEL (M)		GASTO (L.P.S.) EXPLOTACIÓN	TEMPERATURA DEL AGUA °C	ANÁLISIS FÍSICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA
INICIAL	POSTERIOR	ESTÁTICO	DINÁMICO			
A).	A).	25	55	55.55	A).	A).
REHABILITACIÓN						
FECHA DE AFORO		NIVEL (M)		GASTO (L.P.S.) EXPLOTACIÓN	TEMPERATURA DEL AGUA °C	ANÁLISIS FÍSICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA
INICIAL	POSTERIOR	ESTÁTICO	DINÁMICO			
A).	A).	A).	A).	A).	A).	A).

Tabla 3. Ficha técnica del equipo de bombeo en pozo profundo de Santa María Amajac (MEH, IHDEC 1993).

EQUIPO DE BOMBEO: DATOS DE LAS PLACAS								
MOTOR ELECTRICO SUMERGIBLE								
MODELO	MARCA	CAPACIDAD H.P.	TENSION DE OPERACIÓN	R.P.M. FACTOR DE ROTAC	FACTOR DE		EFICIENCIA NORMAL(%)	FECHA DE INSTALACIÓN
					POTENCIA (%)	SERVICIO		
MSU100/10	A).	100	440V	3600	A).	A).	A).	05/03/2006
BOMBA								
TIPO	MARCA	MODELO	CAPACIDAD H.P.	NUMERO DE PASOS	CAUDAL EN L.P.S.	C. DINAMICA TOTAL (m.c.a)	EFICIENCIA NOMINAL %	FECHA DE INSTALACIÓN
A).	BAMSA	164178/3	A).	3	55	97	73	05/03/2006

El pozo cuenta con una caseta de controles donde diariamente es puesto en funcionamiento por un operador (Figura 9), el arreglo de piezas especiales del tren de descarga, está muy comprimido como se muestra en la figura 10 y no cumple con las recomendaciones de la CONAGUA relativa a la separación entre accesorios, de esta manera la ficha técnica se complemento únicamente con la información que nos pudo ser proporcionada (Tabla 4).



Fig. 9 Visita al cuarto de controles y vigilancia así como al equipo de medición



Fig. 10 Detalle del tren de piezas especiales a la salida del equipo de bombeo

Tabla 4. Ficha técnica de las piezas especiales y accesorios en la descarga o tren de descarga del pozo de Santa María Amajac (MEH, IHDEC 1993).

INSTALACIONES MECANICAS		
DIÁMETRO: 8"	LONGITUD: 50m.	ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL: TUBERIA ACERO AL CARBON
ACCESORIOS EN LA DESCARGA O TREN DE DESCARGA		
Codo de 90° de Fo. Fo. de 8" de Ø		Válvula de compuerta de 2" de Ø
Carrete de Fo. Fo. de 8" de Ø, para instalación de manómetro		Válvula de compuerta de 6" de Ø
Carrete de Fo. Fo. de 8" de Ø, para instalación de válvula expulsora de aire		Reducción de Fo. Fo. de 6"x3" de Ø
Válvula Check de 8" de Ø		Reducción de Fo. Fo. de 3"x2" de Ø
Cruz de Fo. Fo. de 8"x6" de Ø		Válvula de compuerta de 2" de Ø
Reducción de Fo. Fo. de 6"x4" de Ø		Válvula de compuerta de 8" de Ø
Válvula de compuerta de 4" de Ø		Codo de 45° de Fo. Fo. de 8" de Ø
Codo de 90° de Fo. Fo. de 4" de Ø		Macromedidor
Reducción de Fo. Fo. de 4"x2" de Ø		Válvula de inserción Mueller 1" de Ø

- Ubicación y características del Adelaido Azpeitia Gutierréz

La ubicación del pozo Adelaido Azpeitia Gutierréz se encuentra en la cabecera municipal de San Salvador a una latitud norte 20°17'00" y longitud oeste de 99°00'58" en el estado de Hidalgo (Figura 11).

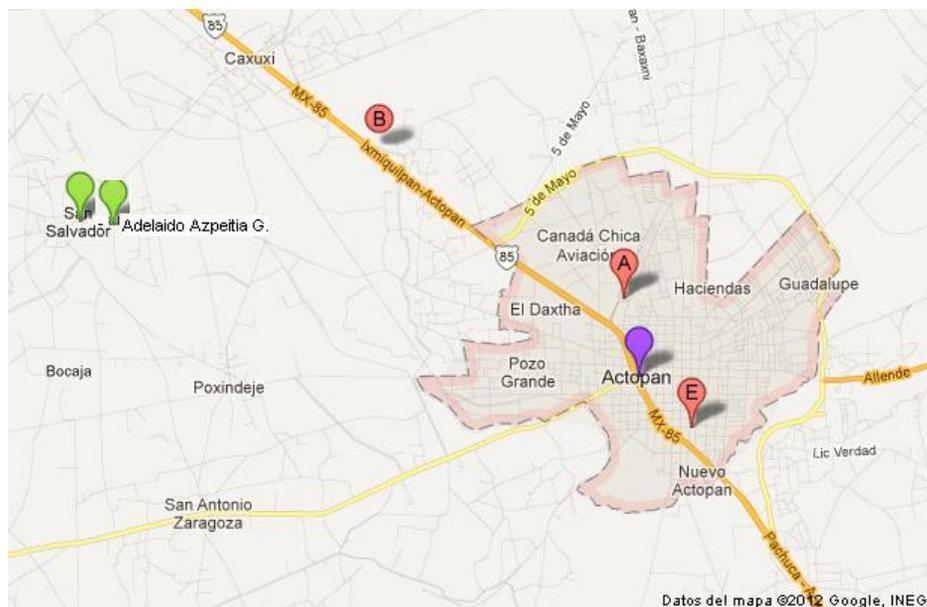


Fig.11 Croquis de localización del pozo Adelaido Azpeitia Gutierréz (INEGI, 2012).

Las características del equipo de bombeo instalado en el pozo Adelaido Azpeitia Gutierréz fueron proporcionados por la Arq. Isabel López Avendaño responsable del servicio de agua potable, con parámetros de selección de gasto (Q)=29.00 l.p.s. y carga dinámica total (CDT)= 60.00 m. El abastecimiento y el equipo de bombeo se explican en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Ficha técnica de fuente de abastecimiento en pozo profundo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).

FICHA TECNICA DE FUENTE DE ABASTECIMIENTO EN POZO PROFUNDO							
ESTADO DE HIDALGO		MUNICIPIO: SAN SALVADOR		ORGANISMO OPERADOR: COMISIÓN ESTATAL DE AGUA Y ALCANTARILLADO			
TIPO DE FUENTE:		POZO BROTAANTE		NOMBRE Y NÚMERO DE APROVECHAMIENTO: SAN SALVADOR			
RESPONSABILIDAD DE LA FUENTE: MUNICIPIO DE SAN SALVADOR				DEPENDENCIA: DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO			
LOCALIZACION							
UBICACIÓN:		LOCALIDAD, COMUNIDAD, COLONIA, BARRIO:				SAN SALVADOR	
CALLES ALEDAÑAS (AREAS DE REFERENCIA):				ALTITUD:			
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:		LATITUD NORTE		20°17'00''		LONGITUD OESTE: 99°00'58''	
TITULOS DE CONCESIÓN						NÚMERO:	
VOLUMENES DE EXPLOTACIÓN AUTORIZADO m ³ /Año				88.367		GASTO AN L.P.S.:	AÑOS:
ACUIFERO:							
REGIÓN HIDROLÓGICA:		26		CUENCA HIDROLÓGICA RIO TULA		ACUÍFERO: 1313ACTOPAN SANTIAGO DE ANAYA	
CONSTRUCCION FUENTE DE ABASTECIMIENTO							
FECHA DE PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD TOTLA EN M.	DIÁMETRO (PULG) DE PERFORACION		LONGITUD DE ADEME EN M.		A). CARECE DE INFORMACION	
A).	60	18"	12"	LISO	RANURADO	B). INFORMACION NO CONGRUENTE	
AFORO INICIAL							
FECHA DE AFORO		NIVEL (M)		GASTO (L.P.S.) EXPLOTACIÓN	TEMPERATURA DEL AGUA °C	ANÁLISIS FÍSICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA	
INICIAL	POSTERIOR	ESTÁTICO	DINÁMICO	A).	24.5	A).	
A).	A).	A).	40	29			
REHABILITACIÓN							
FECHA DE AFORO		NIVEL (M)		GASTO (L.P.S.) EXPLOTACIÓN	TEMPERATURA DEL AGUA °C	ANÁLISIS FÍSICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA	
INICIAL	POSTERIOR	ESTÁTICO	DINÁMICO	A).	A).	A).	
A).	A).	A).	A).				A).

Tabla 6. Ficha técnica del equipo de bombeo en pozo profundo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).

EQUIPO DE BOMBEO: DATOS DE LAS PLACAS								
MOTOR ELECTRICO SUMERGIBLE								
MODELO	MARCA	CAPACIDAD H.P.	TENSION DE OPERACIÓN	R.P.M. FACTOR DE ROTAC	FACTOR DE		EFICIENCIA NORMAL(%)	FECHA DE INSTALACIÓN
					POTENCIA (%)	SERVICIO		
F421A	US	25	460V	1760	0.8	1.15	88.5	A).
BOMBA								
TIPO	MARCA	MODELO	CAPACIDAD H.P.	NUMERO DE PASOS	CAUDAL EN L.P.S.	C. DINAMICA TOTAL (m.c.a)	EFICIENCIA NOMINAL %	FECHA DE INSTALACIÓN
A).	A).	A).	A).	A).	A).	A).	A).	A).

El pozo cuenta con una caseta de controles donde diariamente es puesto en funcionamiento por un operador (Figura 12), el arreglo de piezas especiales del tren de descarga, está muy comprimido como se muestra en la figura 13 y no cumple con las recomendaciones de la CONAGUA relativa a la separación entre accesorios, ni con la

cantidad y tipo de estos ya que no cuenta con manómetro para medir la presión en la descarga ni macromedidor (Tabla 7).

Al no existir la posibilidad de instalar el tren de piezas la válvula de inserción necesaria para las mediciones pitometricas, ésta se instalo al inicio de la instalación, con objeto de obtener un flujo laminar en el punto de medición, y con ello un alto grado de presión en la determinación del caudal.



Fig. 12 Vista al cuarto de controles y vigilancia así como al equipo de medición.



Fig.13. Detalle del equipo de bombeo existente, con motor eléctrico externo acoplado a bomba de tipo vertical.

Tabla7. Ficha técnica de las piezas especiales y accesorios en la descarga o tren de descarga del pozo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (MEH, IHDEC 1993).

INSTALACIONES MECANICAS			
DIÁMETRO:	8"	LONGITUD:	50m.
		ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL:	TUBERIA ACERO AL CARBON
ACCESORIOS EN LA DESCARGA O TREN DE DESCARGA			
Cabezal de Fo. Fo. Codo de 90° de 6" de Ø		Válvula de inserción Mueller 1" de Ø	
Junta dresser de 6" de Ø,			
Válvula Check de 6" de Ø			
Cruz de Fo. Fo. de 8"x6" de Ø			
Válvula de compuerta de 4" de Ø			
Reducción de Fo. Fo. de 4"x2 1/2" de Ø			
Codo de 90° de Fo. Fo. de 4" de Ø			
Reducción de Fo. Fo. de 4"x2" de Ø			
Válvula de compuerta de 6" de Ø			

- Ubicación y características del pozo Pacheco

La ubicación del pozo Pacheco, se encuentra al norte de la cabecera municipal de San Salvador a una latitud norte $20^{\circ}18'00''$ y longitud oeste de $99^{\circ}01'58''$ en el estado de Hidalgo (Figura 14).

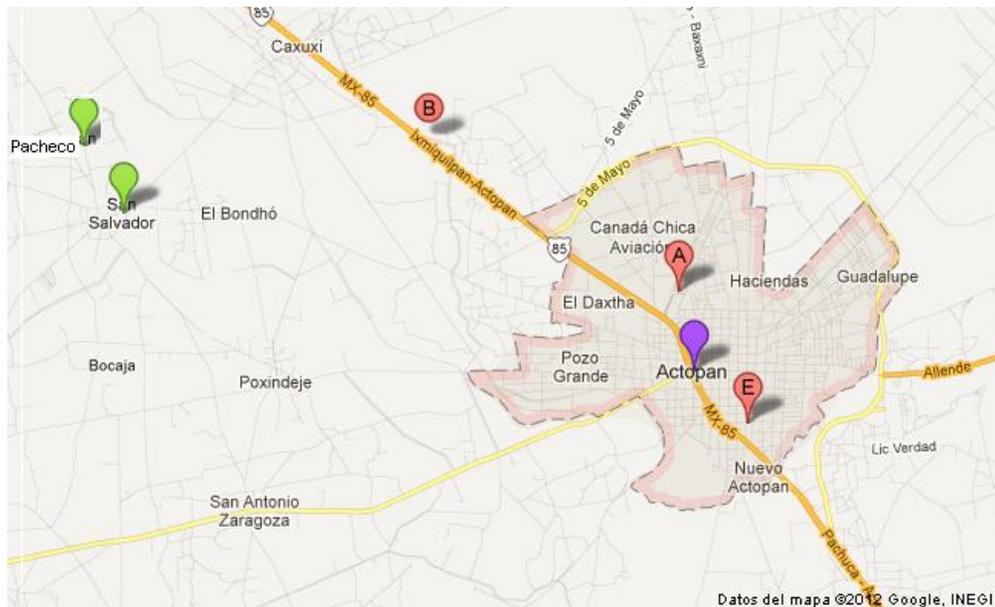


Fig.14 Croquis de localización del pozo Pacheco (INEGI, 2012).

Los datos generales del pozo no fueron proporcionados por la directora de Agua Potable del Ayuntamiento quien argumento que no existe tal documentación, desafortunadamente tampoco ha sido dada de alta en el sitio web de la COGAGUA. La información descrita proporcionada por parte de la localidad (Figuras 15 a 18).

1. Beneficiarios del proyecto 2853 habitantes
2. Gasto requerido 3.35 L.P.S.
3. 400m. de ramal eléctrico de alta tensión
4. Dos equipos electromecánicos para: 3.35 L.P.S., C.D.T.=159.23m. y 10 H.P. del pozo, 3.35 L.P.S., C.D.T.=60m. y 7 H.P. del cárcamo
5. Casetas de controles eléctricos

6. Tanque de almacenamiento de 10m^3
7. Planta potabilizadora
8. Cárcamo de bombeo de 10m^3
9. 270m. de línea de conducción por bombeo con tubo de Fo.Go. de $3''\text{Ø}$
10. 1806m. de línea de alimentación a red de distribución con tubo de Fo.Go. de $4''\text{Ø}$ L=249m., $2''\text{Ø}$ L=30m., y PVC $4''\text{Ø}$ L=2763m., $2''\text{Ø}$ L=991m.
11. Tanque de regularización de 50m^3



Fig. 15. Detalle del equipo de bombeo existente, con motor eléctrico externo



Fig. 16. Planta Potabilizadora a base de filtros.



Fig. 17 Vista al cuarto de controles y vigilancia así como tanque de almacenamiento.



Fig. 18 Tanques de almacenamiento y cárcamo de bombeo.

No existe documentación bibliografía del abastecimiento y el equipo de bombeo del pozo pacheco solo un plano ubicado en la caseta de controles donde se explica cada una de las piezas con las que cuenta el pozo como se muestra en la figura 19

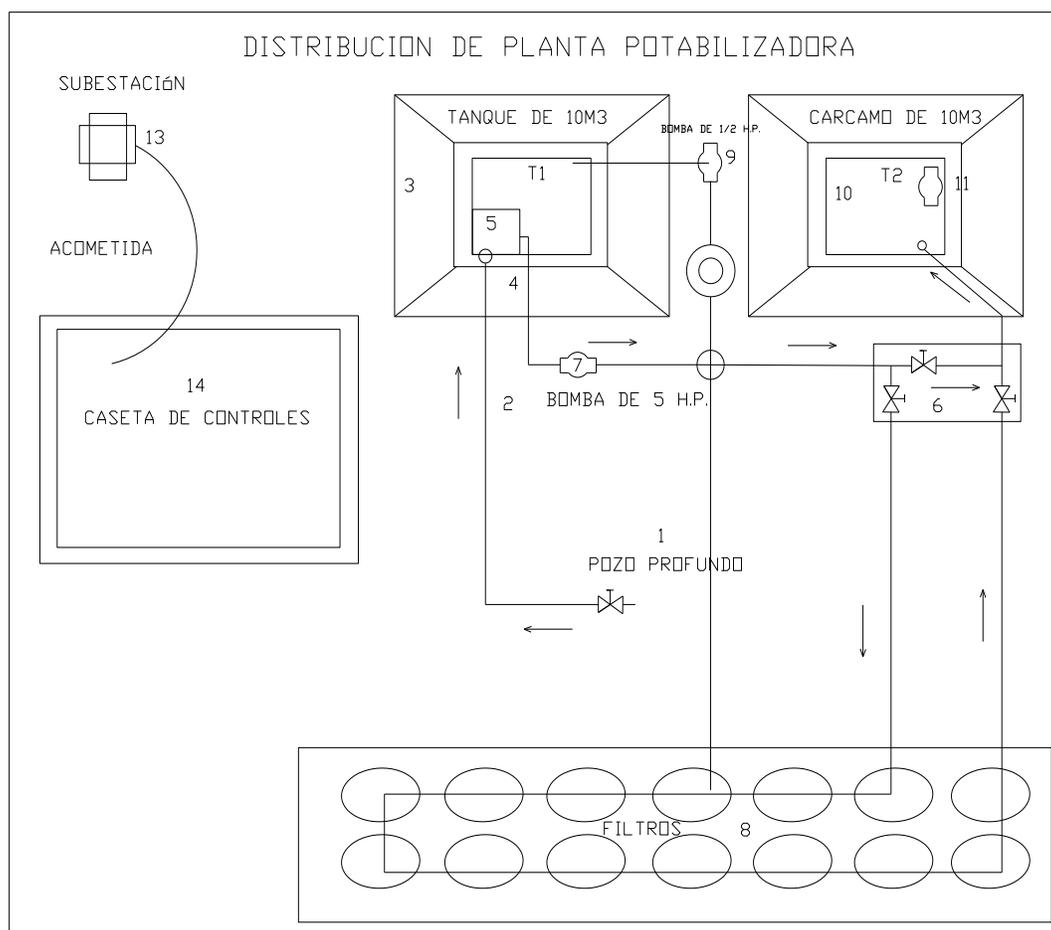


Fig. 19 1 Pozo Pacheco, 2 Alimentación al tanque, 3 Tanque de almacenamiento de 10m^3 , 4 Sistema de oxidación con descarga por gravedad al tanque, 5 Almacenamiento de Hipoclorito de Calcio, 6 Caja de operación, 7 Bomba de 5 H.P., 8 Filtración, 9 Bomba de 1/2 H.P., 10 Tanque de almacenamiento 10m^3 , 11 Bomba de 7 H.P., 12 línea de conducción por bombeo, 13 Subestacion y transformador, 14 Caseta de controles (MEH, IHDEC 1993).

CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE

3.1 Tratamiento Electroquímico de aguas residuales

Publicado por José Aguado Alonso el 17 septiembre, 2010

Departamento de Química Analítica e Ingeniería Química. Universidad de Alcalá

La utilización de procesos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales está adquiriendo cada día más importancia por su versatilidad, reducido tamaño y capacidad de automatización. En ese artículo se hace una pequeña revisión de los distintos procesos electroquímicos aplicados en el tratamiento de aguas residuales y potables.

La utilización de electricidad para tratar aguas residuales tiene una larga tradición, siendo utilizada por primera vez en Inglaterra en 1889. La utilización de procesos electrolíticos en la recuperación de metales fue patentada por Elmore en 1904 y el proceso de electrocoagulación (EC) con aluminio y hierro fue patentado en Estados Unidos en 1909. La primera utilización a gran escala de la EC para el tratamiento de aguas potables fue en 1946. Dado al relativo alto costo de las instalaciones y el alto consumo en energía eléctrica estas tecnologías no tuvieron una buena aceptación en esa época, no obstante distintos países como Estados unido o la antigua Unión soviética continuaron con las investigaciones durante los siguientes años lo que permitió acumular una gran experiencia y conocimiento sobre estos procesos.

La promulgación de leyes cada vez más estrictas concernientes a los límites de vertido de distintas sustancias en las aguas residuales así como la mejora en los estándares de calidad del agua potable han hechos que las procesos electroquímicos ganen cada vez más importancia en las últimos dos décadas y hoy en día hay compañías que suministran sistemas electroquímicos para la recuperación de metales, tratamiento de aguas provenientes de procesos textiles, curtidurías, papeleras, tratamiento de aguas residuales con alto contenido en aceite o emulsiones aceite-agua.

Hoy en día los procesos electroquímicos han alcanzado un estado en el cual no son solamente comparables desde el punto de vista económico con otros procesos sino que también son más eficientes, compactos y automatizados. Los procesos electroquímicos utilizados en el tratamiento de aguas utilizan electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación o destrucción del contaminante presente en el agua. Básicamente el sistema electroquímico está formado por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua encargada de suministrar la electricidad. Los parámetros claves a la hora de aplicar un proceso electrolítico son diseño del reactor, naturaleza de los electrodos, y diferencia de potencial y/o corriente de trabajo. En este artículo se verán brevemente los distintos procesos electroquímicos empleados en el tratamiento de agua.

Electrodeposición. La recuperación electroquímica de metales presentes en el agua proveniente de procesos industriales, se lleva aplicando desde hace mucho tiempo, el primer caso registrado data del siglo XVII. Esta recuperación es de gran importancia tanto desde el punto de vista medioambiental como económico.. El mecanismo de recuperación de metales es muy simple, básicamente una deposición en el cátodo (reducción) del tipo $Mn^{+} + n e^{-} \rightarrow M$.

Los mayores progresos en estos procesos se han realizado en la técnica de recuperación del metal depositado, así como mejoras en la eficiencia de la corriente, es decir metal depositado por unidad de corriente. Como cátodo se puede utilizar un cátodo del mismo metal a recuperar o grafito aplicada.

Electrocoagulación: El proceso de electrocoagulación implica la generación del coagulante in situ disolviendo electrolíticamente ánodos de aluminio o hierro para formar los respectivos cationes Al^{+3} , Fe^{+2} .



Los ánodos empleados se llaman ánodos de castigo ya que se consumen en el proceso. En el cátodo se produce hidrógeno a partir de los protones, éste se libera como pequeñas burbujas que suben a la superficie. Este hidrogeno generado puede ayudar a que las partículas floculadas floten en la superficie recogiendo de ésta con un rascador. Las principales ventajas de la electrocoagulación respecto a la coagulación clásica es la mayor eficiencia de los cationes nacientes de aluminio y hierro generados frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como sulfato de aluminio o hierro, equipos más compactos, menor costo, posible automatización y menor generación de sales y residuos.

Electroflotación. El proceso de electroflotación (EF) es un proceso simple por el cual los contaminantes flotan en la superficie del agua adsorbidos sobre las pequeñas burbujas de hidrógeno y oxígeno generadas respectivamente en el cátodo y en el ánodo en el proceso de descomposición electrolítica del agua. La eficiencia del proceso de flotación está fundamentalmente determinada por el tamaño de las burbujas generadas, son preferibles las burbujas pequeñas ya que proporcionan una mayor superficie de contacto para la adsorción de las partículas a eliminar. Esta una de las principales ventajas del proceso de EF respecto a otros procesos de flotación clásicos como DAF (dissolved air flotation). El 90 % de las burbujas generadas en EF tienen un tamaño entre 15 y 45 μm mientras que en el proceso DAF el tamaño oscila entre 50 y 70 μm .

Electrooxidación. Los procesos de EO son los más interesantes y sus estudios se remontan a finales del siglo XIX, cuando se estudio la descomposición química de cianuro. La idea básica de estos procesos es la oxidación total (mineralización) o parcial (conversión de la materia orgánica a compuestos más sencillo más fácilmente degradables y menos contaminantes) de la materia orgánica utilizando la corriente eléctrica. Estos procesos están íntimamente relacionados con procesos anódicos. La oxidación se divide en dos:

- Directas en este caso el contaminante es oxidado directamente en la superficie del ánodo mediante la generación de oxígeno activo fisisorbido en la superficie del ánodo (radicales hidroxilo $\text{OH}\cdot$ adsorbidos en la superficie del ánodo) o oxígeno activo quimisorbido en la superficie del ánodo (oxígeno en la red del óxido de metal del ánodo MO_{x+1}) El primero de estos procesos, oxígeno activo fisisorbido produce la combustión completa de los compuestos orgánicos, mientras que el oxígeno activo quimisorbido produce una oxidación parcial de los compuestos orgánicos.
- Indirectos La oxidación no ocurre en la superficie del ánodo, en estos caso en el ánodo se generan especies oxidantes como peróxido de hidrógeno, ozono o cloro, proveniente de la oxidación de los cloruros presentes en el agua, que son liberados al agua y son éstos los que realmente oxidan a la materia orgánica presente en el agua.

Electrodesinfección. En este tipo de reacción es similar a la oxidación indirecta, en el ánodo se genera cloro gas por la oxidación de los iones cloruros, que disuelto en el agua genera hipoclorito/hipocloroso, el verdadero desinfectante. La mayor parte de las aguas contienen suficiente cantidad de iones cloruro para lograr la desinfección.

3.2 Comisión Estatal de Agua, Hidalgo

Proyecto realizado por la Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado, Subdirección General de Planeación y Tecnología del Agua, Dirección de Investigación y Desarrollo del Agua y la Subdirección de Agua Limpia, fue el punto de partida para la siguiente investigación ya que en su análisis de resultados muestra una concentración de varios contaminantes entre ellos el Arsénico, cumpliendo con la NOM-127-SSA1-1994 por su efecto de acumulación en el organismo humano se hace el siguiente investigación.

Se consiguieron dos fichas técnicas de muestreo de los pozos en estudio, los cuales fueron Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia Gutiérrez donde se refleja la

contaminación y el método utilizado como se muestra en las figuras 20 y 21, la ficha técnica de pozo Pacheco no se obtuvo por que en el proyecto no fue muestreado desconociendo las causas.

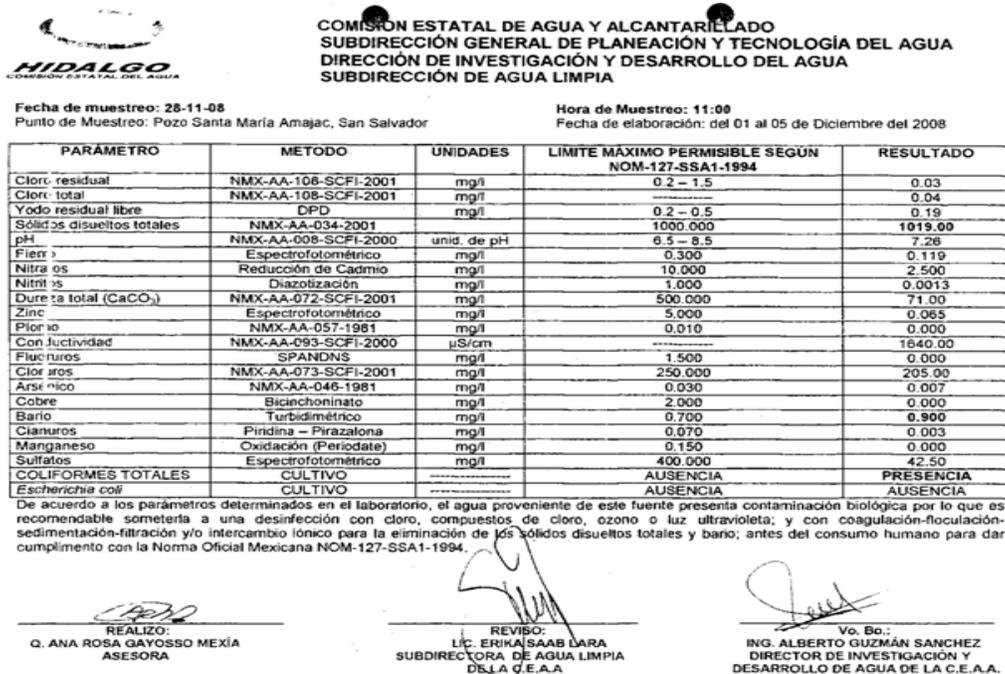


Fig. 20 Ficha técnica de muestreo del pozo Santa María Amajac (CEAyAH, 2008)

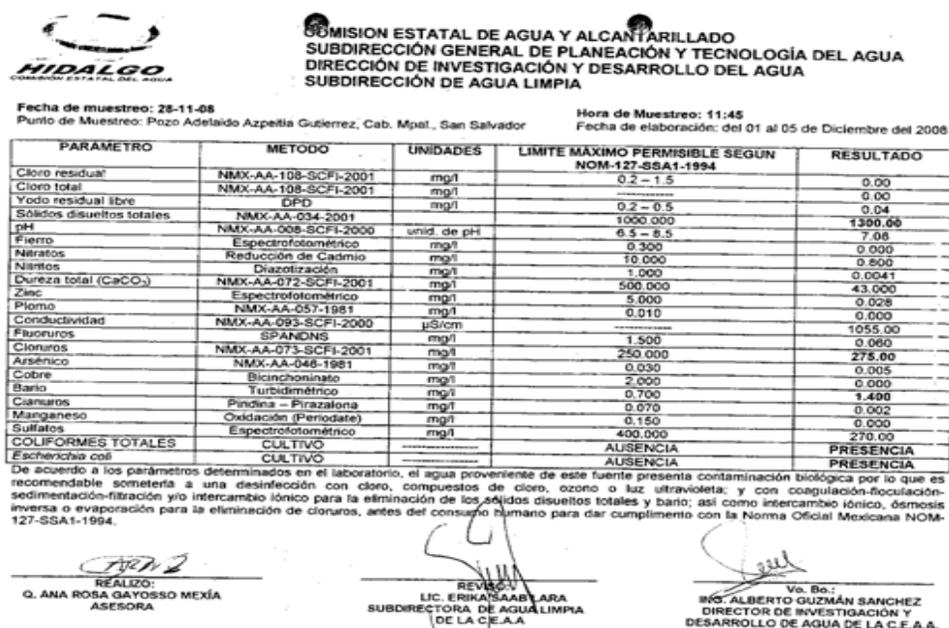


Fig. 21 Ficha técnica de muestreo del pozo Adelaido Azpeitia Gutiérrez (CEAyAH, 2008)

CAPITULO IV: ARSÉNICO Y TOXICIDAD

4.1 Generalidades

El desarrollo tecnológico, el crecimiento demográfico, la industrialización y el uso de nuevos métodos de agricultura tecnificada son factores que contribuyen a que entren al ambiente, de manera continua, cantidades crecientes de gran número de sustancias químicas, sintéticas y naturales, cuyas interacciones y efectos adversos, tanto sobre el ambiente mismo como sobre los seres vivos. Para dar una idea de la magnitud de los problemas ambientales en relación a la posibilidad real de resolverlos, basta recordar que, conforme a datos aceptados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) para 1980, las sustancias químicas de uso cotidiano en el mundo eran aproximadamente 63,000 con un incremento anual de entre 1,000 y 2,000 sustancias (Tabla 8).

Tabla 8. Sustancias química de uso cotidiano (EPA y OMS, 1980).

BIEN ESTUDIADAS	INCREMENTO ANUAL
63,000	1,000-2,000

Las sustancias bien estudiadas en cuanto a sus interacciones y efectos a corto y a largo plazo no exceden las 63,00 y este número aumenta con gran lentitud por la dificultad de los estudios, su alto costo y las deficiencias en la cantidad de las instalaciones y de los expertos necesarios. Además, no hay que olvidar que estas 63,000 sustancias tienen contaminantes de producción y que en el ambiente sufre diversas transformaciones que aumenta su número.

Por otro lado, el principio de Lavoisier establece que la materia y la energía no se crean ni se destruyen, solamente se transforman. Esto es, cualquier forma o cantidad de materia o energía que entre a un sistema, por ejemplo, un organismo vivo o un sustrato del ambiente, debe acumularse, transformarse o salir de él. En el caso de

cualquier sistema abierto, la energía y la materia que entran o salen de él provienen de otros sistemas abiertos con los que está en continuo intercambio.

Cuando las formas de materia o energía son de tal clase que los seres vivos o el ambiente abiótico los pueden asimilar, transformar o eliminar continuamente, se puede considerar que existe una situación estable. Sin embargo, en la actualidad, debido al gran aumento en la cantidad de sustancias que entran continuamente, en muchos casos se ha rebasado la capacidad de los sistema para transformar la sustancia naturales, o bien, los sistemas carecen de la capacidad para asimilar, transformar o eliminar las sustancias sintéticas; por lo tanto, se ha alterado el equilibrio ambiental. Como consecuencia de esto y del principio de conservación de la materia. Esta acumulación se conoce como contaminación.

Los efectos adversos ocurren porque las sustancias no pueden eliminarse fácilmente del sistema y exceden el nivel basal, o bien, porque solo pueden pasar sin cambio de un sistema a otro, l que da por resultado una acumulación excesiva en un punto final. A las formas de materia que exceden las concentraciones naturales en un momento y sistema dados y causan efectos adversos en él se les considera contaminantes tóxicos.

Cualquier actividad humana provoca que entren al ambiente tipos indeseables de materia; sin embargo, mientras la cantidad de estas sustancias no supere la capacidad del ambiente para transformarlas, sus efectos no sean adversos o estén restringidos en el tiempo y en el espacio, se puede considerar que hay una contaminación temporal o parcial que, aunque requiere atención puede evitarse o eliminarse. Los problemas graves aparecen cuando la contaminación se extiende en el tiempo y en el espacio, es decir, cuando el número y clase de los sistemas o sustratos contaminados aumenta y permanecen así por períodos prolongados. Se rompe entonces el equilibrio ecológico y se observan, de manera aislada o simultánea, efectos adversos que pueden ser acumulativos, de umbral o de interacción. Los efectos acumulativos se observan cuando una sustancia dada causa un efecto adverso que es imperceptible por sí mismo

y se elimina del sistema después. A menudo la suma de estos pequeños efectos sólo se observa cuando el daño es irreversible.

Los efectos de umbral ocurren por acumulación de las sustancias mismas y se observan cuando se rebasan una cantidad que es característica de cada sustancia y cada sistema; esta cantidad se conoce como umbral. Por lo que se refiere a los efectos de interacción, éstos se observan cuando dos o más sustancias interactúan entre sí, ya sea químicamente para dar una nueva sustancia, biológicamente causando, en conjunto, daños que no causarían por sí solas (INSHT, 2003).

4.2 Metales tóxicos en el medio ambiente

La mayoría de los elementos de la tierra están ampliamente distribuidos en la litosfera, hidrosfera y la atmósfera. El hombre está expuesto a estos elementos cuando come sus alimentos, bebe agua y respira el aire. Alguno de esos elementos son benéficos y esenciales para sus procesos vitales; otros son muy tóxicos, pero, la mayor parte de los elementos tóxicos que se encuentran en el alimento, el agua y el aire está presente en cantidades pequeñas. Existen cantidades de trazas de muchos elementos distintos que a diario penetran en el organismo humano. Puesto que estas cantidades en trazas son el resultado de la distribución natural de los elementos, son algo inevitable y se conocen como niveles de fondo.

En algunas ocasiones las actividades del hombre y, a veces, un accidente geológico logran introducir ciertos elementos tóxicos en el medio ambiente. Los más notables de estos son los metales pesados, como Plomo (Pb.), Mercurio (Hg.), Cadmio (Cd), Cromo (Cr). No obstante, existen otros elementos problemáticos como el Arsénico (As), Berilio (Be), Antimonio (Sb), Vanadio (V) y Níquel (Ni). Los metales pesados son los que causan mayores problemas, ya que se emplean en grandes cantidades y abundan mucho en la actual sociedad industrial. Esta utilización excesiva ha provocado un aumento en la concentración basal de casi todos estos elementos y ha roto así, sus ciclos biogeoquímicos naturales (Tabla 9).

Por esta razón, algunos organismos absorben de una u otra forma cantidades excesivas de estos elementos los que, en la mayoría de los casos causan efectos mortíferos a los seres vivos (Albert, 1998).

Tabla 9. Sustancias comunes en el ambiente y sus efectos en el ser humano (EPA y OMS, 1980).

METAL	SÍMBOLO	LIMITE (Mg/l)	EFFECTOS
Cadmio	Cd	0.01	Nauseas, vomito, diarrea, anemia
Arsénico	As	0.1	Nauseas, dolor epigástrico diarrea, estreñimiento, anemia, conjuntivitis, trastorno sensoriales
Cobre	Cu	1	Emesis, daños al hígado
Cromo	Cr	0.05	Lesiones nasales, cutáneas, hepáticas renales y úlceras hepáticas
Hierro	Fe	0.3	
Manganeso	Mn	0.5	
Plomo	Pb	0.05	Anemia principalmente en niños daños al sistema nervioso central y periférico, dolor de cabeza y muscular, fatiga, irritabilidad
Zinc	Zn	5	

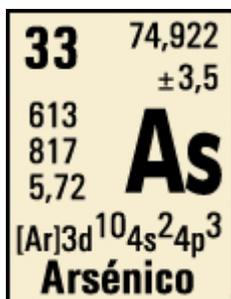
4.3 Arsénico

El arsénico es un elemento y un mineral que se encuentra distribuido ampliamente en el ambiente. Las fuentes ambientales de exposición al arsénico son alimentos, agua, suelo, aire. Dado que es un elemento, el arsénico en el ambiente y no se deteriora.

Compuestos del Arsénico pueden clasificarse en 3 grandes grupos: Inorgánicos, orgánicos, gas arsina.

Las valencias más comunes son:

- As(0) (arsénico metaloide, estado de oxidación 0)
- As(III) (trivalente, estado de oxidación 3, como en los arsenitos)
- As(V) (pentavalente, estado de oxidación 5, como en los arseniatos)
- Gas Arsina (estado de oxidación -3)



Nombre	Arsénico
Número Atómico	33
Símbolo	As
Peso Atómico	74.922

Tabla 10. Propiedades Electrónicas y Físicas del Arsénico (ATSDR, 2007).

Propiedades Electrónicas		Propiedades Físicas	
Valencia	+3,-3,5	Densidad (g/ml)	5,72
Electronegatividad	2,1	Punto de Ebullición	613
Radio covalente	1,19	Punto de fusión °C	817
Radio iónico (estado de oxidación)	0,47(+5)		
Radio atómico	1,39		
Estructura atómica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³		
Potencial 1ero de ionización (eV)	10,08		

La toxicidad relativa de los compuestos de Arsénico depende principalmente de su forma, ya sea orgánica o inorgánica, de su valencia, de su solubilidad, de su estado físico y pureza, y de sus tasas de absorción y de eliminación (ATSDR 2007).

La toxicidad de los compuestos de arsénico puede variar considerablemente. De manera general, podemos ubicar a los compuestos de arsénico, de mayor a menor toxicidad, de la siguiente forma: 1.-Compuestos inorgánicos trivalentes, 2.-Compuestos orgánicos trivalentes, 3.-Compuestos inorgánicos pentavalentes, 4.-Compuestos orgánicos pentavalentes y 5.-Arsénico elemental (Gorby, 1988).

En general, el arsénico inorgánico es más tóxico que el orgánico. Por otra parte, las formas de arsénico que se absorben más rápidamente, son más tóxicas, y las que se eliminan con facilidad tienden a ser menos tóxicas. Los arsenitos y los arseniatos son altamente solubles en agua.

Aunque los compuestos orgánicos de arsénico se consideran menos tóxicos que los inorgánicos, algunos derivados del arsénico que contienen grupos metilo o fenilo, muy usados en agricultura, causan preocupación por los efectos sobre la salud de animales de experimentación. Entre estos compuestos se encuentran el ácido monometilarsónico y sus sales, así como el ácido dimetilarsínico y sus sales, y el Roxarsone (ácido 4-hidroxi-3 nitrobenenoarsónico), la arsenobetaina y la arsenocolina son las formas orgánicas del “arsénico de los peces” y son relativamente no tóxicas para los humanos. El gas arsina es el compuesto de arsénico más tóxico (exposición aguda) (ATSDR, 2007).

4.4 Distribución en la Naturaleza del Arsénico

La liberación del Arsénico al ambiente es el resultado tanto de las actividades humanas como de las actividades naturales. El arsénico puede ingresar al ambiente de manera natural a través de agua subterránea, minerales, procesos geotérmicos, se le encuentra natural como mineral de cobalto, aunque por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como Mn, Fe, Co, Ni, Ag o Sn. El principal mineral del arsénico es el FeAsS (arsenopirita, pila); otros arseniuros metálicos son los minerales FeAs₂ (löllingita), NiAs (nicolita), CoAsS (cobalto brillante), NiAsS (gersdorfita) y CoAs₂ (esmalta). Los arseniatos y tioarseniatos naturales son comunes y la mayor parte de los minerales de sulfuro contienen arsénico

Fuentes naturales e industriales

El arsénico es liberado al ambiente por los volcanes, por la erosión de los depósitos minerales que contienen arsénico y por diversos procesos comerciales e industriales, se encuentra de manera natural en la corteza terrestre. Mucha de su dispersión en el ambiente se debe a la minería y a procesos comerciales. En la industria, el arsénico es un subproducto del proceso de la fundición (separación del metal y la roca) de diversos minerales metálicos como el cobalto, níquel, oro, plomo, zinc.

El Arsénico en los medicamentos

El arsénico se ha usado y se usa actualmente en productos medicinales.

- Actualmente, el arsénico se utiliza en la quimioterapia de inducción y de consolidación para tratar la leucemia promielocítica aguda, así como para tratar otros cánceres (Miller *et al.*, 2002; Hu *et al.* 2005).
- El arsénico se puede encontrar en algunos remedios tradicionales que provienen de varios países asiáticos (Garvey *et al.*, 2001; Chan, 1994).
- La “solución de Fowlers”, que contiene un 1% de trióxido de arsénico, se utilizó en épocas pasadas para tratar enfermedades cutáneas como la psoriasis y el eczema. Así mismo, se utilizó para tratar la leucemia y la estomatitis. Al asociarse el uso de la solución de Fowler con el cáncer de piel, se redujo sensiblemente el uso del arsénico para fines médicos (Rossman, 2007).
- La arsfenamina (Salvarsan) fue la primera cura efectiva para la sífilis, hasta que fue reemplazada por los antibióticos al término de la Segunda Guerra Mundial (Rossman, 2007).

El Arsénico en diversos componentes

Todavía se pueden encontrar pesticidas discontinuados que contienen arsénico en algunas granjas y hogares de los EUA, el arseniuro de galio se usa en componentes integrales de celdas químicas fotoeléctricas, diodos emisores de luz, microondas, láseres, semiconductores, el gas arsina, la forma más toxica del arsénico (en exposiciones agudas), se usa comercialmente en la industria de la microelectrónica, y se puede encontrar accidentalmente en los procesos metalúrgicos y de minería, también se utiliza en la producción de semiconductores y se produce cuando un ácido u otra sustancia reductora se añade a compuestos que contienen arsénico, como los metales en los que éste elemento es un contaminante de bajo nivel (ATSDR, 2007).

El Arsénico en alimentos

El Arsénico puede encontrarse en alimentos como:

- La comida de mar especialmente en bivalvos [almejas, ostras, ostiones, mejillones], crustáceos [cangrejos, langostas], y en ciertos peces de aguas frías que se alimentan en el fondo marino, así como en algas marinas.
- Las formas orgánicas de arsénico que se encuentran en la comida de mar (principalmente la arsenobetaina y la arsenocolina, también conocidas como “arsénico de los peces”) generalmente se consideran no tóxicas, y se excretan en la orina 48 horas después de haber sido ingeridas (ATSDR, 2007).
- No obstante, se han encontrado algunos tipos de arsénico inorgánico en algunos tipos de algas. Existen referencias recientes sobre la presencia de muy altos niveles de arsénico inorgánico en las algas hijiki (Rose *et al.*, 2007).

Tabla 11. Fuente de arsénico vs. contaminación ambiental potencial (ATSDR, 2007).

Fuente de Arsénico	Contaminación ambiental
Pozos artesianos en acuíferos contaminados geológicamente	Agua potable
Minerales	Agua potable y suelo
Erosión de tierras, desechos de minas y molinos, materiales con arsénico que son transportados por la lluvia	Agua potable y suelo

4.5 Rutas de exposición del Arsénico

Las principales rutas de entrada del arsénico al cuerpo son la ingestión y la inhalación. Aunque es posible que pueda ocurrir la exposición dérmica, ésta no se considera una ruta primaria de exposición. La dosis de exposición es la exposición acumulada de todas las rutas.

El 80% de la ingesta de arsénico se debe al consumo de carne, pescado y pollo que contiene este elemento. Los pescados, los mariscos bivalvos y las algas también contienen arsénico, como arsenobetaina y arsenocolina, las cuales en ocasiones se

conocen como “Arsénico de los peces”. Estas formas de arsénico presentan una baja toxicidad en los humanos

Arsénico en el Agua y Suelo

En varias partes del mundo se ha reportado que el agua de pozos artesianos puede contaminarse con el arsénico presente en rocas del subsuelo (Tabla 12). Particularmente, desde que en los años noventa se descubrió la contaminación de agua potable con arsénico en los pozos de Bangladesh, el tema del arsénico en el agua ha captado la atención de muchas personas (WHO, 2001).

Tabla12. Países en los que se han reportado contaminación de agua de pozos por arsénico debido a fuentes naturales (NRC, 2000).

Alemania	China	Rumania
Argentina	Grecia	España
Bangladesh	India	Taiwán
Bolivia	Japón	Vietnam
Canadá	México	Estados Unidos
Chile	Mongolia	Ghana

La forma en que se ingiere el arsénico en el agua de bebida depende de la exposición que ésta haya tenido con el aire. El agua de pozos profundos contiene principalmente arsenitos (arsénico III), mientras que el agua de superficie contiene predominantemente arseniatos (Arsénico IV) (Rossman, 2007).

El agua subterránea también puede tener concentraciones elevadas de arsénico debido a:

- Contaminación debido a escurrimientos de conservadores para madera que contienen arsénico
- Escurrimientos de campos agrícolas
- Mala eliminación de compuestos con arsénico, o minería

En los siguientes países se han reportado casos de contaminación de agua potable por actividades humanas: Brasil, Chile, India, México, Nicaragua, y Tailandia (IARC, 2004). En ciertas áreas del oeste, medio-oeste, suroeste y noreste de Estados Unidos se ha reportado la presencia de arsénico en agua de pozos en niveles superiores a los 50 microgramos por litro (ppb) (Rossman, 2007). La EPA ha establecido que el nivel máximo de arsénico en agua potable es de 10 ppb (ATSDR, 2007), no obstante, la biodisponibilidad del arsénico en el suelo es variable, y depende de la forma química en la que se presente. La incorporación de arsénico en las plantas no parece alcanzar niveles que se consideren peligrosos para la salud humana (Rossman, 2007).

Por otra parte, es posible que en países en donde se quema carbón contaminado con altos niveles de arsénico, exista un riesgo para la salud de las personas que inhalan las cenizas de este producto (Rossman, 2007).

Inhalación de Arsénico

Las principales fuentes del arsénico que es inhalado son despepitadoras, fábricas de pesticidas, fundidoras, operaciones de manufactura de vidrio, humo de tabaco, y quema de combustibles fósiles que contienen arsénico (Rossman, 2007).

Actualmente, los niveles altos en exposiciones ocupacionales son más raros puesto que el nivel de exposición permitido es de 0.01 miligramos por metro cúbico. No obstante, puede presentarse una intoxicación al inhalarse los humos de la incineración de materiales que contienen arsénico, como la madera tratada con conservadores (Aposhian, 1989).

Arsénico en la Piel

Puede ocurrir una exposición al arsénico por contacto dérmico al manejar productos de madera tratados con conservadores que contienen arsénico. Sin embargo, no se conoce lo suficiente sobre la forma química, las condiciones de absorción, y la cinética

del arsénico como para hacer una declaración sobre la absorción por la piel en poblaciones específicas (NAS, 1977). Hay referencias en la literatura ocupacional que hablan de efectos tóxicos posteriores a la salpicadura de tricloruro de arsénico o de ácido arsénico en la piel de algunos trabajadores (Gorb y Hine, 1977).

4.6 Riesgo de sufrir exposición al Arsénico

En la actualidad, en México y Estados Unidos, las cantidades de arsénico emitidas por las actividades humanas por lo menos triplican las cantidades emitidas por fuentes naturales. Las principales fuentes que emiten arsénico al ambiente son madera tratada con arsénico presente en los rellenos sanitarios y centrales carboeléctricas. Además, los sitios de los que se ha extraído mineral con arsénico presentan niveles más altos de este elemento en el agua y en el suelo.

El agua del subsuelo también puede contener concentraciones elevadas de arsénico debido a la contaminación de los residuos de plaguicidas que contienen compuestos arsenicales. El agua del subsuelo tiende a presentar niveles más altos de arsénico que el agua de superficie. La concentración de arsénico en el agua de superficie y en el agua del subsuelo se sitúa generalmente en 1 ppb, pero este valor puede ser de 1,000 ppb en zonas mineras o en zonas con altos niveles de arsénico en el suelo (ATSDR, 2007). Los criterios de la EPA marcan como nivel máximo de arsénico en el agua potable 10 ppb. Los muestreos del agua potable en México y Estados Unidos revelan que el 80% de los suministros de agua tienen menos de 2 ppb de arsénico, mientras que el 2% tienen más de 20 ppb., el arsénico en el agua potable puede encontrarse tanto en su forma trivalente como en la pentavalente. En el suelo pueden presentarse niveles reducidos de arsénico que está allí de manera natural.

Exposición en niños

Los niños pueden estar expuestos al arsénico en diferentes maneras.

En ocasiones, con el fin de evitar el crecimiento de microorganismos que pudran la madera, se le da a esta un tratamiento con arsenato cromado de cobre. Comúnmente se usa en estructuras marinas, terrazas de patios y juegos infantiles. Las personas pueden estar expuestas al arsénico al cortar esta madera tratada o al filtrarse el conservador. No obstante, no se conoce en qué medida la madera tratada con CCA contribuya a la exposición al arsénico (ATSDR, 2007).

Los niños que juegan en estructuras de madera que han sido tratadas con arsenato cromado de cobre tienen una mayor probabilidad de ingerir arsénico o de tener contacto dérmico con el mismo. Esto debido a las actividades propias del juego y a la costumbre de llevarse objetos a la boca (ATSDR, 2007). El suelo con altos contenidos de arsénico también constituye un riesgo de exposición para los niños debido al comportamiento de pica y a la costumbre de llevarse objetos a la boca. Otro riesgo de exposición para los niños lo constituye la contaminación del agua potable con arsénico.

Exposiciones laborales y no laborales

Hoy en día, en México, las personas con más alta exposición al arsénico son los trabajadores de industrias que utilizan compuestos que contienen arsénico, como por ejemplo: aplicación de pesticidas, carpintería en la que se usa madera tratada a presión, fundidoras de cobre o de plomo, e industria manufacturera de componentes electrónicos (Rossman, 2007).

Las siguientes situaciones ilustran ejemplos en los que puede ocurrir una exposición no ocupacional al Arsénico.

- Personas cuyo abasto de agua contiene un alto nivel de arsénico.
- Personas que viven cerca de fuentes que tienen un alto nivel ambiental (en aire) de arsénico.
- El arsénico puede atravesar la placenta, provocando una mayor probabilidad de exposición del feto (Lugo *et al.*, 1969).

4.7 Normas y regulaciones para la exposición al arsénico

Se sabe que los efectos tóxicos del arsénico dependen de la naturaleza y de la extensión de la exposición (dosis), y particularmente de la concentración de arsénico en el momento de la exposición, la frecuencia de la exposición, la duración de la exposición, y el tipo de arsénico presente durante la exposición.

Las normas del gobierno Mexicano para el arsénico incluyen: una norma para niveles de arsénico en el aire, aplicable al lugar de trabajo, una norma para el arsénico en el agua potable, y una norma para los animales que se utilizan como comida.

Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su potabilización"

Norma que está vigente y que a la letra dice:

- Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización de agua para uso y consumo humano.
- Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

En las tablas 13 y 14 se presentan los límites máximos permisibles de los cuatro grupos de compuestos.

Tabla 13. Límites permisibles de características microbiológicas modificadas (NOM-127-SSA1-1994).

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables

Tabla 14. Límites permisibles de características Físicas y organolépticas (NOM-127-SSA1-1994).

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelometrías (UTN) o su equivalente en otro método.

Tabla 15. Los límites permisibles de algunos metales que se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos (NOM-127-SSA1-1994).

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
Arsénico	0,05
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN-)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250,00
Cobre	2,00

1. Nota 1 Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en agua la cual incluye los suspendidos y disueltos
2. Nota 2 El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual.

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

4.8 Destino biológico del Arsénico en el cuerpo

Las principales vías de entrada del arsénico al cuerpo son la ingesta y la inhalación, la absorción por vía dérmica también ocurre, pero en menor medida, la vida media del

arsénico inorgánico en los humanos es de aproximadamente 10 hrs. El arsénico sufre biometilación en el hígado. Aproximadamente el 70% del arsénico se excreta, principalmente por la orina. La mayor parte de una dosis única, de bajo nivel, se excreta en los siguientes días posteriores a la ingesta, aproximadamente el 95% de una dosis ingerida de compuestos de arsénico trivalente se absorbe en el tracto digestivo (Rossman, 2007).

Pulmones y Absorción dérmica

El arsénico en el aire de los centros laborales generalmente se encuentra como trióxido de arsénico (Ishinishi *et al.*, 1986). Aún no se determina con precisión cuál es la cantidad de arsénico que se absorbe por inhalación, pero se piensa que sea de un 60% a un 90% (Yip y Dart, 2001), las partículas de tamaño más pequeño alcanzan a depositarse más a fondo en el tracto respiratorio. La absorción dérmica es insignificante, aunque se han reportado efectos sistémicos tóxicos en accidentes laborales en los que el tricloruro de arsénico o el ácido arsénico cayeron en la piel de algunos trabajadores. Después de haber sido absorbido en los pulmones o en el tracto digestivo, el arsénico se distribuye ampliamente por el cuerpo vía el torrente sanguíneo. (ATSDR, 2007).

La mayoría de los tejidos desecha el arsénico, excepto la piel, el pelo y las uñas. (Lansdown, 1995). De dos a cuatro semanas después de que cesa la exposición al arsénico, esta sustancia puede encontrarse en tejidos ricos en queratina como: cabello, huesos y dientes, en menor medida, piel, y uñas (Yip y Dart, 2001).

Metabolismo

El arsénico se absorbe en el torrente sanguíneo a nivel celular y se incorpora en glóbulos blancos, glóbulos rojos, y otras células que reducen el arsenato a arsenito (Winski y Carter 1995; Wang *et al.*, 1996). Es necesario que el arsenato (As V) se reduzca a arsenito (As III) antes que pueda ocurrir la metilación. Esta reacción requiere

del glutatión (Miller *et al.*, 2002; Vahter *et al.*, 1983). Una parte del arsenito (As III) es metilada en el hígado por la transferencia enzimática del grupo metilo de la S-adenosilmetionina que forma el arsenato de metilo (MMA V) y el arsenato de dimetilo (DMA V) (Aposhian *et al.*, 2004; Styblo *et al.*, 2002).

Se considera que la metilación es la principal vía de desintoxicación de arsénico, aunque recientemente diversos estudios proponen otros mecanismos alternos de desintoxicación. Por ejemplo, se sabe que varias especies animales carecen de mecanismos de metilación del arsénico pero son capaces de excretar arsénico inorgánico (Vahter, 2002). Esto sugiere que puede haber en los mamíferos otros mecanismos importantes de desintoxicación de arsénico. Otras investigaciones sugieren la existencia de mecanismos adicionales de desintoxicación, como: defensas antioxidantes, resistencia a la apoptosis, y transporte (Yoshida *et al.*, 2004).

Otras investigaciones del metabolismo del arsénico sugieren que la metilación del arsénico inorgánico puede ser una ruta de intoxicación más que de desintoxicación. Aparentemente, la eficiencia de la metilación en los seres humanos decrece a dosis altas de arsénico. Los patrones observados en especies de arsénico metilado (en orina) son similares entre hermanos y, entre padres y hermanos. Esto sugiere que la metilación del arsénico está ligada genéticamente (Chung *et al.*, 2002).

Cuando una persona sobrepasa la capacidad de metilación del hígado, y sigue expuesta a niveles altos de arsénico inorgánico, se observa un incremento en la retención del arsénico en los tejidos blandos.

Excreción

El arsénico se excreta en la orina principalmente a través de los riñones. Los seres humanos excretan una mezcla de arsénico inorgánico, arsénico monometilado y arsénico dimetilado (pero no de arsénico trimetilado). Cerca del 50% del arsénico excretado en la orina humana es arsénico dimetilado, el 25% es arsénico

monometilado, y el resto es arsénico inorgánico (Buchet *et al.*, 1981). No obstante, puede haber variaciones individuales en estos porcentajes. Según los datos de la Encuesta Nacional sobre Salud y Nutrición 2003-2004 (descritos también en la sección “Evaluación clínica, exámenes de laboratorio” de este documento), conforme aumentan los niveles urinarios de arsénico total, el porcentaje de las formas metiladas también aumenta. A niveles menores de arsénico total en orina, predomina el arsénico inorgánico (Caldwell *et al.*, 2008).

El llamado arsénico de los peces no se biotransforma en vivo, y en cambio es excretado rápidamente, sin cambios, en la orina. Después de habersele administrado a voluntarios humanos una sola inyección intravenosa de arsénico inorgánico trivalente As (III), se observó que la mayoría del arsénico fue excretado por vía urinaria en 2 días. Sin embargo, se registraron pequeñas cantidades de arsénico en la orina hasta 2 semanas después (ATSDR, 2007). Se estima que la vida media del “arsénico de los pescados” en los seres humanos es de menos de 20 horas, desalojado completamente por vía urinaria en aproximadamente 48 horas (ATSDR, 2007). Dado que el arsénico se desaloja rápidamente de la sangre, los niveles sanguíneos de este elemento pueden ser normales aunque los niveles en la orina se mantengan en un nivel elevado (ATSDR, 2007). Otras vías menos importantes de eliminación del arsénico inorgánico son: descamación de la piel, incorporación en cabello y uñas, heces, y sudor.

4.9 Cambios patogénicos inducidos por el Arsénico

El arsénico es una pequeña molécula que puede entrar fácilmente a las células y provocarles daños e incluso la muerte por múltiples mecanismos. La alta toxicidad del arsénico se puede explicar porque este metaloide interfiere directamente con la respiración celular. Además, el gas arsina puede interactuar de manera negativa con las membranas de los glóbulos rojos. Se conoce que el arsénico es un carcinógeno humano, aunque los mecanismos específicos que sigue para provocar cáncer no están todavía bien entendidos.

4.10 Efectos fisiológicos de la exposición al arsénico

El arsénico afecta a prácticamente todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución. Los efectos más claros de la exposición al arsénico se observan en la piel (ATSDR, 2007). Algunos estudios identifican otros lugares como resultado de exposiciones similares al arsénico a las que producen lesiones cutáneas. Las bases de datos sobre estas lesiones son más sólidas que para otras partes del cuerpo (ATSDR, 2007).

Algunos de los efectos fisiológicos de la exposición al arsénico que se abordarán más adelante de manera detallada. Hiperpigmentación cutánea en parches, queratosis focal pequeña, y otras lesiones dérmicas que aparecen posteriormente a una exposición alta y crónica al arsénico. Es difícil establecer asociaciones fuertes entre la exposición al arsénico y la aparición de enfermedades, puesto que la prevalencia y el espectro de las enfermedades que están ligadas a la exposición crónica del arsénico varían entre países, e incluso dentro de un mismo país. El arsénico puede provocar cáncer en pulmón y piel, e inclusive puede causar otros tipos de cánceres. Se observa una mayor fuerza de asociación entre la exposición crónica al arsénico y los cánceres de piel, pulmón y vejiga. Por otra parte, se observa una menor fuerza de asociación entre la exposición al arsénico y los cánceres de hígado (angiosarcoma), riñón, y otros tipos de cáncer (IARC, 2004; NRC, 2000).

Cabe resaltar que cuando se utiliza el término fuerza de asociación (definida como la magnitud del riesgo relativo en el grupo expuesto, comparada con el riesgo relativo en el grupo control) en esta sección, se hace referencia a uno de los cinco criterios utilizados para decidir si una asociación positiva en los estudios epidemiológicos indica causalidad. No se requiere necesariamente que se establezca una causalidad. Inclusive, es posible que se cumplan varios de los criterios aún y cuando la asociación sea resultado del azar. En un estudio epidemiológico, el no demostrar la existencia de una asociación positiva no siempre indica que no haya una asociación entre el agente que se está estudiando y sus efectos.

Efectos gastrointestinales

Los efectos gastrointestinales (GI) del arsénico generalmente son resultado directo de la ingesta de este elemento. Sin embargo, otras rutas de exposición diferentes pueden producir también efectos GI, se observan de manera aguda después de la ingesta del arsénico. Se observan menos comúnmente después de la inhalación o de la absorción por vía dérmica. La principal lesión en el tracto GI consiste en un aumento en la permeabilidad de los vasos sanguíneos pequeños, que lleva a la pérdida de fluidos y a la hipotensión, puede presentarse una inflamación extensiva y una necrosis en la mucosa y submucosa del estómago e intestino, las cuales pueden derivar en la perforación de la pared de la víscera, puede presentarse una gastroenteritis hemorrágica que provoca diarrea sanguinolenta.

Efectos hepáticos

La toxicidad aguda al arsénico puede asociarse a una necrosis hepática y a niveles elevados de las enzimas hepáticas, la intoxicación por arsénico puede resultar en una hepatitis tóxica, con niveles elevados de enzimas hepáticas, la ingesta crónica de arsénico puede derivar en hipertensión portal cirrótica. (ATSDR, 2007; Datta, 1976). Existen reportes de casos que relacionan la exposición crónica de alto nivel de arsénico con el angiosarcoma hepático, una forma poco común de cáncer de hígado (Popper *et al.*, 1978; Zaldívar *et al.*, 1981; ATSDR, 2007). No obstante, existe una fuerza de asociación limitada entre la exposición crónica de arsénico y el angiosarcoma hepático, según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) y el Consejo Nacional de Investigación [NRC, por sus siglas en inglés (IARC 2004; NRC, 2000)].

Efectos renales

El arsénico puede tener efectos negativos en los riñones: La toxicidad sistémica que se presenta en la intoxicación aguda severa por arsénico puede incluir una necrosis

tubular aguda junto con una falla renal aguda, también se ha reportado insuficiencia renal crónica por necrosis cortical, el daño glomerular puede provocar una proteinuria, el riñón no es el órgano más sensible a la intoxicación crónica por arsénico, ya que otros aparatos y sistemas pueden verse afectados a dosis menores, hay una fuerza de asociación limitada entre la exposición crónica al arsénico y el cáncer renal (IARC, 2004; NRC, 2000). El gas arsina tiene más efectos nefrotóxicos que el arsénico. No obstante, ambos son capaces de causar una necrosis tubular (Giberson *et al.*, 1976).

Efectos cardiovasculares

Tanto la exposición aguda como la exposición crónica a altos niveles de arsénico pueden provocar una amplia gama de efectos cardiovasculares adversos. Existe una fuerza de asociación limitada entre la exposición crónica al arsénico y la enfermedad vascular periférica, la hipertensión y la enfermedad cardiovascular (IARC, 2004), la intoxicación aguda por arsénico puede causar tanto una fuga capilar difusa como una cardiomiopatía, las cuales pueden conducir a un estado de choque, la amplitud del daño cardiovascular puede variar dependiendo de la edad, la dosis de arsénico, y la susceptibilidad individual.

Estudios experimentales revelan que la exposición al arsénico provoca una inhibición de la sintasa del óxido nítrico en el endotelio, cambios en la coagulación, e inflamación. Todo ello puede contribuir al desarrollo de aterosclerosis (Simeonova and Luster 2004), una exposición a largo plazo al arsénico provoca hipertensión (Chen *et al.* 1995).

Efectos neurológicos

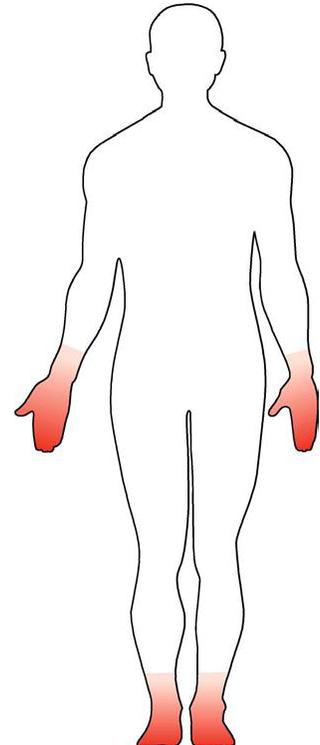
Algunas investigaciones que apoyan una asociación revelan que los pacientes expuestos al arsénico pueden presentar destrucción de los cilindros del axón, lo cual puede conducirlos a sufrir una neuropatía periférica. Esto se ha reportado tanto en exposiciones agudas a dosis altas (>2 mg As/kg/día), como en exposiciones repetidas a niveles menores (0.03–0.1 mg As/kg/día) (Chakraborti *et al.*, 2003a, 2003b; ATSDR,

2007), el hallazgo clásico consiste en una neuropatía periférica que involucra más neuronas sensitivas que motoras, siguiendo una distribución simétrica de guante y calcetín (Murphy *et al.*, 1981), en las exposiciones a altos niveles de arsénico, el inicio de la neuropatía puede ocurrir después de 7 a 14 días, presentándose de manera intensa en calambres musculares, dolor espontáneo, parestesia, sensibilidad muscular, y sudoración en la parte distal de las extremidades inferiores (Bleecker, 2007).

El efecto neurológico más común que se presenta en una intoxicación crónica por arsénico, “guante y calcetín”, (Figura 19).

El mecanismo de la neuropatía causada por el arsénico puede ser similar al de la neuropatía causada por la deficiencia de tiamina (Sexton y Gowdy, 1963). Las formas neurotóxicas del arsénico incluyen al arsénico trivalente (arsenito), al arsénico pentavalente (arseniato) y a los metabolitos metilados del arsénico, al ácido monometilarsónico y al ácido dimetilarsénico (Foa *et al.*, 1984).

Fig.22 Ilustración de la neuropatía periférica predominante sensitiva que se denomina guante y calcetín (ATSDR, 2007).



Se ha reportado la presencia de encefalopatías posteriores a exposiciones agudas y crónicas. La neuropatía es principalmente sensitiva. La exposición crónica afecta más la sensibilidad a la vibración y a la posición. En ocasiones, una exposición crónica al arsénico puede provocar una ligera debilidad en los músculos internos de las extremidades (Bleecker, 2007). La neuropatía se debe principalmente a la destrucción de los cilindros neuronales. Los estudios de conducción nerviosa y de electromiografías muestran comúnmente la presencia de una axonopatía sensomotora, y pueden documentar la severidad y progresión de la misma. La recuperación de una neuropatía provocada por exposición crónica al arsénico generalmente es lenta, puede tardar años, y es posible que la recuperación total jamás se logre.

Efectos dérmicos

Las hiperqueratosis palmo-plantares y los cambios en la pigmentación de la piel son característicos de la exposición crónica al Arsénico. Las queratosis benignas causadas por el Arsénico pueden tornarse malignas. Un efecto retardado de la exposición crónica o aguda al arsénico es la aparición de líneas de Mee en las uñas, las líneas de Mee son líneas horizontales que aparecen en las uñas de los dedos (Figura 23).



Fig. 23 Queratosis por arsénico en las palmas de las manos de un paciente que consumió agua contaminada por un largo periodo (Fotografía cortesía del Dr. Joseph Graziano, 2007).

Las lesiones cutáneas que se presentan más frecuentemente en personas expuestas al arsénico son hiperqueratosis, en exposiciones a niveles altos el inicio de neuropatías puede iniciar de 7 a 14 días, con intensa sudoración profusa en extremidades distales inferiores, hiperpigmentación, y cáncer de piel.

La hiperpigmentación irregular, un elemento patológico distintivo de la exposición crónica, puede presentarse en cualquier parte del cuerpo axilas, cuello, ingle, párpados, pezones. La aparición común en la piel de zonas café oscuras con manchas pálidas dispersas se describe como “gotas de lluvia en un camino polvoriento”. En casos severos, la pigmentación puede extenderse ampliamente en el pecho, espalda y abdomen. Se han observado estos cambios de pigmentación en poblaciones que han

consumido de manera crónica agua con 400 ppb o más de arsénico (ATSDR, 2007) (Figura 24).



Fig. 24 El paciente de la fotografía desarrolló una hiperpigmentación severa posterior a la ingesta prolongada de agua contaminada con Arsénico (ATSDR, 2007).

La hiperqueratosis por arsénico ocurre con más frecuencia en las palmas de las manos y en las plantas de los pies. Las queratosis generalmente se presentan como callos de entre 0.4 y 1cm. En la mayoría de los casos, las queratosis por arsénico no muestran una marcada atipia celular y de hecho pueden conservarse como morfológicamente benignas por décadas, las células adquieren una marcada atipia (precancerosa), la cual no puede distinguirse de la enfermedad de Bowen, que es un carcinoma in situ de las células escamosas que se revisa en la sección de Efectos Carcinogénicos (ATSDR, 2007). También se han reportado carcinomas de células basales (Cohen y Moore, 2007).

Algunos factores de confusión del cáncer de piel inducido por arsénico pueden incluir a: la exposición al sol, la enfermedad hepática crónica, y el estado nutricional del paciente (Hsueh *et al.*, 1995) (Figura 25).



Fig. 25 Cáncer de piel en la palma de un paciente que ingirió agua contaminada con arsénico de un pozo por un largo periodo (ATSDR, 2007).

Efectos respiratorios

La inhalación de altas concentraciones de compuestos de arsénico provoca una irritación de la mucosa respiratoria. Los trabajadores de fundidoras que estuvieron sujetos a exposiciones prolongadas de altas concentraciones de arsénico en niveles que ya no se encuentran en la actualidad, presentaron lesiones inflamatorias y erosivas en la mucosa respiratoria. Tales lesiones podían llegar inclusive a la perforación del tabique (septo) nasal, se ha asociado al cáncer de pulmón con la exposición crónica al arsénico en los trabajadores de fundidoras y de industrias que producen plaguicidas (ATSDR, 2007).

Efectos reproductivos

La exposición al arsénico está ligada a un aumento en la frecuencia de abortos espontáneos y a un aumento en las malformaciones congénitas. El arsénico es un teratógeno que tiene efectos tóxicos en el sistema reproductor (Shalat, 1996). Atraviesa la membrana placentaria y sus concentraciones en la sangre del cordón umbilical son similares a las concentraciones en la sangre materna, un reporte de caso publicado describe la ingesta aguda de arsénico durante el tercer trimestre del embarazo, con la muerte del bebé 12 hrs. después del parto. La autopsia reveló una hemorragia intra-

alveolar, así como altos niveles de arsénico en el cerebro, hígado y riñones (ATSDR, 2007).

Efectos carcinogénicos

En los humanos, la ingesta crónica de arsénico puede provocar cánceres de hígado, piel, pulmón, próstata, riñón, vejiga (ATSDR, 2007), se ha asociado a la inhalación crónica de compuestos de arsénico con el cáncer de pulmón, una forma poco común de cáncer de hígado (Falk *et al.*, 1981). Varios estudios epidemiológicos de gran escala sobre la exposición al arsénico han establecido la existencia de una asociación y/o tendencias de dosis-respuesta en tumores de hígado, pulmón, próstata, riñón, y vejiga (ATSDR, 2007). Según la IARC y el NRC, la asociación más fuerte entre la exposición crónica al arsénico y el cáncer se da en la piel, pulmón y vejiga. El cáncer de hígado (angiosarcoma), el de riñón, y otros tipos de cánceres presentan una fuerza limitada de asociación (IARC, 2004; NRC, 2000) (Tabla 16).

Se ha establecido la carcinogenicidad del Arsénico en los seres humanos.

Tabla 16. El arsénico inorgánico es un carcinógeno humano (IARC, 2004).

Agencia	Clasificación de Carcinogenicidad	Descripción
Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC)	1	Carcinógeno humano conocido
Programa Nacional de Toxicología	----	Carcinógeno humano conocido
Agencia para la conservación del Ambiente (EPA)	Grupo A	Carcinógeno humano conocido

Cáncer de piel

El cáncer de piel puede aparecer 3 o 4 décadas después de que una persona haya estado ingiriendo arsénico. Por otra parte, los efectos cutáneos no carcinogénicos pueden aparecer unos cuantos años después de haber estado expuesto al arsénico (ATSDR, 2007). Una exposición crónica al arsénico inorgánico en el agua de bebida y

en el lugar de trabajo se asocia con un aumento en el riesgo de sufrir cáncer de piel. El cáncer de piel inducido por el arsénico se caracteriza por la presencia de lesiones en todo el cuerpo, principalmente en áreas no expuestas como palmas de las manos, plantas de los pies, y tronco.

Un paciente puede presentar más de un tipo de cáncer de piel, la mayoría de los taiwaneses que desarrollaron cáncer dérmico por haber consumido agua contaminada con arsénico, presentaron varios tipos de cáncer (ATSDR, 2007). Los más frecuentes (de mayor a menor) fueron:

- Carcinoma intraepidérmico (Enfermedad de Bowen's)
- Carcinoma de las células escamosas
- Carcinomas de las células basales

El 72% de los pacientes taiwaneses que presentaban cáncer de piel también presentaban hiperqueratosis, y el 90% presentaban hiperpigmentación, algunas lesiones hiperqueratinizadas pueden convertirse en un carcinoma intraepidérmico, el cual puede tornarse invasivo. Las lesiones se presentan bien demarcadas, con placas redondas o irregulares que tienden a crecer y que oscilan entre 1 mm y más de 10 cm (ATSDR, 2007).

Cáncer de pulmón

Diversos estudios epidemiológicos han confirmado la existencia de una asociación entre el cáncer de pulmón y la exposición ocupacional al arsénico inorgánico (Enterline *et al.*, 1987). El arsénico se considera un causante del cáncer de pulmón y de la piel. Existe un gradiente sistemático en las tasas de mortalidad por cáncer de pulmón entre los trabajadores expuestos al arsénico, dependiendo de la duración e intensidad de la exposición (ATSDR, 2007); se encontró un mayor riesgo de cáncer de pulmón en los trabajadores de fundidoras expuestos al trióxido de arsénico y en trabajadores de otros entornos expuestos a pesticidas que contenían arsénico pentavalente, no se encontró

en estos estudios que la exposición concomitante al bióxido de azufre o al humo del cigarro fuese un cofactor importante.

4.11 Evaluación clínica

Los pacientes que hayan estado expuestos al arsénico y en los que se sospeche intoxicación por este metaloide deben someterse a una evaluación médica minuciosa. Un diagnóstico temprano y certero es importante para poder decidir cuáles serán las estrategias de cuidado apropiadas, aún si el paciente no muestra síntomas de intoxicación. En aquellos casos de una exposición significativa al arsénico, la evaluación médica debe incluir historia de exposición, historia clínica, pruebas de laboratorio, según se requieran, y examen físico.

En esta sección se resaltan las acciones que se realizan típicamente cuando el paciente acude al consultorio. Las pruebas recomendados se abordan en el próximo apartado.

Presentación Clínica

Las enfermedades asociadas al arsénico generalmente tienen un período de latencia prolongado, por lo que muchos pacientes expuestos al arsénico permanecen asintomáticos por años. Las manifestaciones clínicas de toxicidad en órganos blanco se basan en dosis, forma química, frecuencia, duración e intensidad de la exposición, ruta de exposición, y tiempo transcurrido desde la exposición. Un mismo paciente puede desarrollar cualquier combinación de enfermedades asociadas al arsénico, en muchos casos no se puede identificar la fuente de exposición al arsénico. Por esta razón, con el fin de identificar dicha fuente, es necesario realizar una cuidadosa historia de exposición, una revisión física, trabajo de laboratorio, y pruebas ambientales.

Historia de exposición y exploración física.

Los resultados de exámenes neurológicos y dermatológicos pueden ofrecer pistas sobre una intoxicación con arsénico. La historia de exposición debe incluir dieta (enfaticando la frecuencia, cantidad y tipo de ingesta de mariscos), condición de las mascotas domésticas, historia laboral, historia residencial (si el paciente vive o vivió cerca de refinerías, otras industrias, huertas o granjas, y vertederos de sustancias peligrosas), medicamentos (incluyendo remedios tradicionales, importados, homeopáticos o naturopáticos), métodos de calentamiento del hogar (estufas de madera, chimeneas y fuentes de combustible), origen del agua de bebida, y pasatiempos (incluyendo el uso de suministros de pesticidas o herbicidas en trabajos de granja o de jardinería).

Una muestra de una historia de exposición puede obtenerse del documento «Cómo realizar una historia de exposición», de la serie de Estudios de Caso en Medicina Ambiental del ATSDR.

Signos y síntomas de exposición aguda

En la intoxicación aguda por arsénico, la muerte sobreviene debido a un colapso cardiovascular y a un estado de choque hipovolémico. La dosis letal en humanos para el trióxido de arsénico ingerido es de 70 a 180 mg, o aproximadamente 600 microgramos por kg/día (ATSDR, 2007). El inicio de una neuropatía periférica puede presentarse varias semanas después de la exposición inicial al arsénico, las líneas de Mee pueden hacerse visibles en las uñas varias semanas o meses después de una intoxicación aguda por arsénico. Las líneas de Mee son líneas blancas y transversales que aparecen en las uñas (Rossman, 2007), en la actualidad, casi no se presentan casos de intoxicación aguda por arsénico en los centros de trabajo. Son más comunes los casos de intoxicación aguda por ingesta no intencional, suicidio u homicidio, la dosis letal de arsénico ingerido en humanos es difícil de determinar a partir de reportes de casos y depende de muchos factores (p. ej. solubilidad, valencia, etc.).

La dosis letal mínima se sitúa en el rango de 1 a 3 mg/kg. (ATSDR, 2007), la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (2003-2004) midió los niveles de arsénico total

y de arsénico especiado en orina en una muestra representativa de la población de Estados Unidos. Los resultados revelan contribuciones relativas de exposiciones de fondo al arsénico inorgánico y al arsénico relacionado con mariscos entre la población estadounidense para más detalles. La toxicidad directa del arsénico inorgánico en las células epiteliales del tracto digestivo, unida a la inhibición enzimática sistémica, puede provocar una gastroenteritis profunda, a veces con hemorragia, minutos u horas después de la ingesta de arsénico.

Los signos y síntomas de la intoxicación aguda y sub-aguda por arsénico incluyen:

Gastrointestinal: Agruras, mal aliento, anorexia, deshidratación, diarrea como agua de arroz o con sangre, disfagia, dolor abdominal severo, náusea y vómitos, sed.

Dérmico: aparición tardía de líneas de Mee en la zona blanca de las uñas, dermatitis, melanosis, vesiculaciones.

Cardiovascular: Arritmia ventricular, hipotensión, insuficiencia cardiaca congestiva, inversión de la onda T y prolongación persistente del intervalo QT, ulso irregular,

Respiratorio: Edema pulmonar, irritación de la mucosa nasal, faringe, laringe y bronquios, neumonía bronquial, y perforación del tabique (septo) nasal, traqueobronquitis.

Neurológico: Ataques cerebrales, calambres en piernas, coma, debilidad, delirio, desorientación, dolor de cabeza, encefalopatía, hiperpirexia, letargia, neuritis, neuropatía axonal periférica sensoriomotora (parestesia, hiperestesia, neuralgia), parálisis.

Hepático: Congestión, colangitis, colecistitis enzimas hepáticas elevadas, infiltración grasa, necrosis central

Renal: Hematuria, oliguria, proteinuria, necrosis tubular aguda, necrosis cortical renal. Hematológico anemia, coagulación intravascular diseminada, leucopenia, supresión de la médula ósea, trombocitopenia.

Signos y síntomas horas o días después de una exposición aguda

A continuación se presenta un listado de signos y síntomas potenciales en una intoxicación por arsénico de tipo sub-aguda o retrasada, por tiempo transcurrido desde la exposición aguda:

Gastrointestinal

- Los síntomas pueden durar varios días.
- Puede haber dificultad para tragar, dolor abdominal, vómito, diarrea y deshidratación.
- No obstante, en una intoxicación sub-aguda el inicio de síntomas gastrointestinales leves puede ser tan insidioso que se puede pasar por alto la intoxicación por arsénico.

Sistema cardiovascular

- Como se ha mencionado antes, el arsénico tiene efectos muy negativos en el corazón y el sistema vascular periférico.
- La dilatación de los capilares con fuga de fluido al tercer espacio puede ocasionar una hipovolemia severa e hipotensión.
- Las manifestaciones cardíacas pueden incluir cardiomiopatía, disritmias ventriculares (taquicardia ventricular atípica y fibrilación ventricular), e insuficiencia cardíaca congestiva.

Neurológico

- Después de una intoxicación aguda por arsénico puede presentarse una neuropatía sensomotora periférica.
- Los síntomas iniciales son sensitivos y pueden comenzar entre 2 y 4 semanas después de la resolución de los primeros signos de la intoxicación (estado de choque o gastroenteritis).
- Algunos síntomas comúnmente reportados incluyen adormecimiento, cosquilleo y sensaciones como de “agujas y alfileres” en las manos y pies, siguiendo una distribución simétrica “de guante y calcetín”. También puede aparecer una sensación de sensibilidad en los músculos de las extremidades.
- El compromiso clínico abarca el espectro desde parestesia leve con ambulación preservada hasta debilidad distal, tetraplejia y en raras ocasiones, insuficiencia de músculos respiratorios.
- Otros signos y síntomas de la intoxicación sub-aguda por arsénico pueden incluir edema facial y fiebre.

Signos y síntomas varios meses después de la exposición aguda al arsénico (ATSDR, 2007).

- Los signos y síntomas que aparecen varios meses después de la exposición aguda al arsénico incluyen:
- La aparición de estrías blancas (bandas pálidas) transversales en las uñas. Estas estrías se conocen como líneas de Mee (o líneas de Aldrich-Mee) y reflejan una disrupción transitoria del crecimiento de las placas de las uñas durante la intoxicación aguda.
- En algunos casos se puede evaluar cuánto tiempo atrás ocurrió el episodio de intoxicación simplemente midiendo la distancia de la línea con respecto a la base de la uña.
- En episodios de varias exposiciones agudas, pueden aparecer varias líneas de Mee en una misma uña.

Irritación del tracto respiratorio

- La exposición aguda (por vía aérea) a polvo que contenga arsénico puede ocasionar tos, laringitis, bronquitis leve y disnea.
- También se ha reportado perforación del tabique (septo) nasal, conjuntivitis y dermatitis exfoliativa.

Seguimiento y el tratamiento a los pacientes expuestos al Arsénico

Los pacientes que se presenten con su médico con una historia de exposición al arsénico tendrán diferentes condiciones clínicas. Algunos estarán asintomáticos, otros se presentarán con los síntomas iniciales de una enfermedad asociada al arsénico, mientras que otros más se presentarán con la enfermedad más avanzada. El tipo de cuidado que se le dé al paciente, así como cualquier derivación clínica que se sugiera, dependerá en última instancia del estado clínico del paciente. Aquellos pacientes que se encuentren en una exposición laboral excesiva (arsénico en orina mayor a 35 microgramos por litro) se beneficiarán con una intervención temprana en el centro del trabajo que prevenga cualquier exposición peligrosa en el futuro.

CAPITULO V: FUENTES DE CONTAMINACIÓN

5.1 Tipos de Contaminación.

Conforme a la naturaleza del agente contaminante, se suele distinguir entre contaminación biológica, contaminación física y contaminación química (Tabla 17).

Tabla 17. Tipos de contaminación Biológico, Físicos y Químicos (PROFEPA, 2002).

TIPO	EJEMPLOS	MEDIDAS DE PREVENCION Y CONTROL
BIOLOGICO	Virus Bacterias Protosuarios Otros parasitos Hongos Vegetales	Vacunación Higiene y saneamiento
FISICOS	Calor Ruido Radiaciones	Eliminar las fuentes de origen Implementar medidas de protección Pertinentes
QUIMICOS	Hidrocarburos Metales Plaguicidas	Eliminar, controlar o disminuir la producción y su uso Medidas de protección ambiental y humana Legislación

Contaminación Biológica

La contaminación biológica propiamente dicha requiere que un microorganismo (bacteria, virus o protozooario) se encuentre en un sustrato al que no pertenece o en uno al que sí pertenece pero en concentraciones que exceden a las naturales. En general, se puede evitar o controlar con relativa facilidad. Así, la contaminación de los suelos, las aguas, el aire o los alimentos causa, a corto plazo efectos adversos que son localizado en el tiempo y en el espacio, lo que facilita identificar su origen, así como ponerles remedio en un plazo razonable. Aunque este tipo de contaminación causa altas tasas de mortalidad, es relativamente controlable por medio de higiene, ingeniería sanitaria, etc. Por la facilidad que permite para asociar causa y efecto, está bien estudiada.

Contaminación Física

La contaminación física se debe a la presencia en un sustrato dado de formas de energía que exceden a los niveles basales. La contaminación térmica, la contaminación por ruido y la contaminación radiactiva son algunos ejemplos de ella, por sus características, tiene efectos a largo plazo que son sutiles y cuya asociación causa – efecto es difícil de establecer. Por esto, pueden pasar años antes de que se observen los efectos y de que la fuente contaminante se detecte, se identifique y se pueda controlar. La contaminación física causa diversos efectos biológicos tales como muerte de especies (flora y fauna), problemas en salud humana de tipo psiconeurológico, alteraciones genéticas, cáncer, etc. Por lo tanto, constituye uno de los campos de estudio de la toxicología ambiental.

Contaminación Química

Aunque la contaminación ambiental química se inició con la Revolución Industrial, por estar entonces limitada a las pocas zonas industriales existentes, el daño que causó no fue evidente y no hubo preocupación al respecto, fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial que el desarrollo tecnológico causó un aumento notable en el número de zonas industrializadas del mundo y, además, un aumento en el número de sustancias en uso. Estos incrementos, a su vez, causaron efectos adversos evidentes que motivaron la preocupación social que ahora existe sobre las consecuencias indeseables del desarrollo tecnológico. De esta preocupación han surgido diversos movimientos que han reunido a cada vez más organizaciones y sociedades académicas civiles dedicadas al estudio y protección del ambiente. También se ha propiciado el desarrollo de varias disciplinas nuevas como la toxicología ambiental y la química analítica ambiental.

Para que exista la contaminación química se requiere que una sustancia química definida se acumule en un sustrato dado en concentraciones que excedan el nivel basal. Esta sustancia puede ser natural o sintética. Si la sustancia existe en la

naturaleza (sustancia natural) el origen de su acumulación pueden ser las actividades del hombre; en este caso, las sustancias se denominan antropogénicas, si el origen no son las actividades del hombre, se dice que existe una contaminación química de origen natural, ejemplo de esto son la contaminación de granos por mico toxinas y la contaminación de la atmósfera por las erupciones volcánicas.

Origen de la contaminación Química

La contaminación química de origen natural suele ser limitada en el tiempo y en el espacio, ya que está asociada a circunstancias biogeoclimáticas especiales. Por lo tanto, al existir límites y origen bien definidos, se puede identificar con facilidad y, en algunos casos, se puede eliminar. A diferencia de la contaminación química natural, la contaminación química de origen antropogénico puede ocurrir también por la entrada al ambiente de sustancias sintéticas y, por lo tanto, tiene una gran variedad de causas. Por lo mismo, ocasiona diversos efectos adversos tanto a corto como a largo plazo.

Las principales causas Antropogénicas de la Contaminación.

- a) Las actividades productivas, como: La explotación de los recursos renovables y no renovables, la agricultura, la industria.
- b) Las actividades no productivas, por ejemplo: El transporte, las actividades domésticas, los servicios.
- c) Los procesos sociales, tales como: La urbanización, el crecimiento demográfico, los movimientos migratorios.
- d) Las alteraciones en el patrón cultural, como: La economía de consumo, tabaquismo, alcoholismo y drogadicción

Los problemas que causa esta contaminación son entre otros:

- a) Biológicos, Ecológicos, Toxicológicos.
- b) No biológicos: Estéticos, Económicos, Físicos

5.2 Industria minera

El factor de movilización de los metales Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, y Zn asociado a la industria minera, comparado al movimiento natural de ellos, corresponde a un valor mayor de diez. La liberación hacia al ambiente ocurre en las diferentes etapas de extracción, refinado. Procesado y manufactura de bienes donde se requieren. Es de considerar cual es el mineral principal que se procesa en los fundidores, cuando se trata del procesado de Zn, se asocia a su vez a una mayor concentración de cadmio, debido a que este metal es un producto residual de la extracción del zinc. Los rangos de concentración que se han detectado en las cercanías de fundidores para el cadmio y plomo son de; 900 a 1500 mg / Kg. y de 200 a 1200 mg / Kg. respectivamente. Estos valores permiten caracterizar sitios altamente contaminados con metales (Murunga y Zawada, 2007). A medida que se aleja de la fuente contaminadora, por efecto de velocidad de viento, topografía, vegetación y precipitación, la concentración de metales disminuye exponencialmente respecto a la distancia de la fuente. Adicionalmente se debe tomar en cuenta que posiblemente la cantidad que en la actualidad es emitida, disminuye debido al reciclaje de desechos y reuso del metal principal, así como a una creciente presión de la sociedad y autoridades para que se reduzcan las emisiones.

5.3 Depositación atmosférica

La presencia de metales en la atmósfera, se debe principalmente al consumo de combustibles fósiles, tal como el carbón y petróleo; para el caso del carbón, en función de la región donde se explota, el contenido de cadmio varía de 0.13 a 2.4 mg / Kg. En la actualidad existe fuerte tendencia a reducir substancialmente las emisiones de metales, producto de la combustión de combustibles, de tal forma que el total de Pb y Cd emitidos al ambiente corresponden por esta fuente a sólo 0.8 y 0.03% respectivamente a escala mundial (Fergusson,1990). Las fuentes no estacionarias, implican una introducción de los metales al suelo vía las actividades propias de la agricultura y que no es consecuencia de una aplicación de metales en forma expofesa.

Las fuentes estacionarias, que corresponden a las depositaciones producto de la actividad humana, que por sí misma pueden implicar introducción de metales al suelo, ellas son: Aplicación de pesticidas, Esguimientos de granjas, Desechos municipales, Lodos producto del tratamiento de aguas residuales, Emisiones de vehículos motorizados.

5.4 Movilización de metales

El movimiento de metales pesados en el interior del suelo ocurre principalmente en la fase líquida, ya sea en forma catiónica o en forma de complejos solubles, por lo cual la intensidad de su movilización es controlada por la distribución del metal entre la fase sólida y la solución del suelo. Las formas en que se produce el traslado de los metales desde el sitio de formación o de aplicación, son similares a las de cualquier otro elemento presente en la solución; esto es, se puede desplazar ya sea por difusión, flujo de masa y por movimiento de metal unido a partícula a través de canales, fisuras o macro poros. La difusión es importante para el traslado a corta distancia y el flujo se produce generalmente en dirección hacia la zona de raíces de los cultivos. El flujo de masa juega un papel más importante para el desplazamiento de los metales a grandes distancias (Dowdy y Volk, 1983).

5.5 Métodos de análisis de metales

Existen diferentes métodos de tratamiento para reducir el arsénico presente en el agua y alcanzar los niveles de los valores guía de agua para consumo humano. Debido a que el As+5 es más fácil de remover que el As+3, el tratamiento se inicia con la oxidación del As+3 a As+5. Los oxidantes más utilizados son: cloro, hipoclorito de calcio y permanganato de potasio.

Existen diversas técnicas que pueden ser utilizadas para llevar a cabo la remoción de arsénico:

Coagulación/Filtración: Es un proceso de tratamiento por el cual las cargas eléctricas de las sustancias coloidales disueltas o suspendidas son neutralizadas con la adición de sustancias insolubles en el agua, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración (Tabla 18).

El tipo y la dosis del coagulante y el pH influyen en la eficiencia del proceso. El rendimiento del sulfato de aluminio es ligeramente menor que el del sulfato férrico. A un pH de 7.6 o menor, ambos coagulantes tienen la misma eficiencia de remoción, sin embargo el sulfato férrico remueve mejor a un pH menor de 7.6. Se determinó que a dosis mayores de 20 mg/l de cloruro férrico ó 40 mg/l de sulfato de aluminio se alcanza una remoción de As+5 de más del 90 %. A bajas dosis de coagulantes la remoción de As+5 es menor (Metcalf y Eddy, 1991).

Tabla 18. Coagulantes utilizados en el tratamiento de coagulación-floculación (Metcalf y Eddy, 1991).

Coagulante Químico	Fórmula	Peso Molecular	Densidad (lb/ft ³) Seco	Densidad (lb/ft ³) Líquido
Alúmina	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O*	666.7	60 – 75	78 – 80 (49%)
	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 14H ₂ O*	594.3	60 - 75	83 – 85 (49%)
Cloruro férrico	FeCl ₃	162.1	-	84 – 93
Cal	Ca(OH) ₂	56 como CaO	35 - 50	-
Sulfato férrico	Fe ₂ (SO ₄) ₃	400	-	-
	Fe ₂ (SO ₄) ₃ · 3H ₂ O	454	-	70 - 72

Alúmina activada: Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución. Remueve efectivamente el arsénico en el rango de pH entre 8 y 9. No obstante, el selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos totales compiten con el arsénico y afectan la duración del proceso. Las consideraciones que se tiene en este proceso comprende el pH, iones competitivos, tipo de resina, alcalinidad, concentración de arsénico en el afluente, disposición de la resina y los regenerantes usados, efectos secundarios de la calidad del agua y los parámetros de diseño de la operación.

Ósmosis inversa: Es un proceso para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica. Tiene una eficiencia de más de 95 % de remoción de arsénico disuelto. Este método es efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas. El rendimiento del proceso con ósmosis inversa es afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice.

Intercambio iónico: Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución. Remueve efectivamente el arsénico en el rango de pH entre 8 y 9. No obstante, el selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos totales compiten con el arsénico y afectan la duración del proceso. Las consideraciones que se tiene en este proceso comprende el pH, iones competitivos, tipo de resina, alcalinidad, concentración de arsénico en el afluente, disposición de la resina y los regenerantes usados, efectos secundarios de la calidad del agua y los parámetros de diseño de la operación.

Nano filtración: Es un proceso de separación líquida mediante membranas operadas bajo presión que permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular en el rango de 200 a 1000. Se puede remover el As⁺⁵ y el As⁺³ disueltos en el agua. Con este método se alcanza hasta una remoción de 90% de arsénico disuelto en aguas subterráneas. Este proceso no es tan apropiado para tratar aguas superficiales debido al extensivo pretratamiento que se requiere para remover partículas sólidas o coloidales del agua. La remoción depende de los parámetros de operación, propiedades de la membrana y el estado de oxidación del arsénico.

Ablandamiento con cal: Es un método usado para remover la dureza del agua y consiste en adicionar cal (Ca(OH)₂) al agua. Este método es efectivo para remover As⁺³ ó As⁺⁵ y la eficiencia de la remoción está en función del pH. Este método tiene un

alto rendimiento para remover concentraciones de arsénico de 50 $\mu\text{g/L}$; sin embargo para reducir a 1 $\mu\text{g/l}$ se necesita de un tratamiento secundario. La remoción de As^{+5} es mayor al 90 % a un pH de 10.5 o más, siendo el pH óptimo de operación mayor que 10.5. Por debajo del rango del pH óptimo la remoción disminuye a menos del 20%. En el sistema de ablandamiento con cal se produce una considerable cantidad de lodo.

Eliminación del arsénico del agua usando luz solar y aire: Investigadores australianos desarrollaron un método muy simple para eliminar el arsénico del agua potable (y también residuos mineros) usando únicamente luz solar y aire (Yong, 1996). En Faridpur (Bangladesh) existe una unidad potabilizadora de agua, de casi un siglo de antigüedad, que reduce la concentración de arsénico en agua (por debajo de los estándares del país) simplemente por medio de luz solar y filtración.

CAPITULO VI: METODOLOGIA

La metodología hace referencia al conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar objetivos que rijan en una investigación científica (Maurice 2006). La evaluación de la eliminación de Arsénico por Electroquímica, se llevó a cabo de acuerdo a la metodología (Figura 26).

6.1 Descripción de la metodología

1. Recopilación y análisis bibliográfico para la documentación del marco teórico.
2. El muestreo se llevo a cabo en cuatro diferentes ocasiones en dos localidades del Municipio de San Salvador en el estado de Hidalgo las cuales son Santa María Amajac y San Salvador, en base a la NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM-014-SSA1-1993 donde se tomaron 6 muestras; 3 para análisis en el Laboratorio Tecnoambiental S.A. de. C.V. y las otras 3 para el análisis en del proceso de Electroquímica el laboratorio de Sanitaria en ESIAz.
3. Colocación del equipo de Electroquímica en el Laboratorio de Sanitaria de ESIAz para su ejecución.
4. Las muestras mandadas al Laboratorio Tecnoambiental fueron analizadas de acuerdo a NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. Para conocer la concentración de Arsénico (As)
5. Las muestras llevadas al Laboratorio de Sanitaria en ESIAz. Son sometidas a la aplicación de Electroquímica en un tiempo de 115 min.
6. Las muestras obtenidas después del proceso de Electroquímica son almacenadas y llevadas nuevamente a Laboratorio Tecnoambiental para su análisis

7. Los resultados obtenidos son comparados en base a la revisión a detalle de cada una de las muestras obtenidas existentes y generadas por Electroquímica para su posterior comparación.

6.2 Diagrama de flujo de la metodología

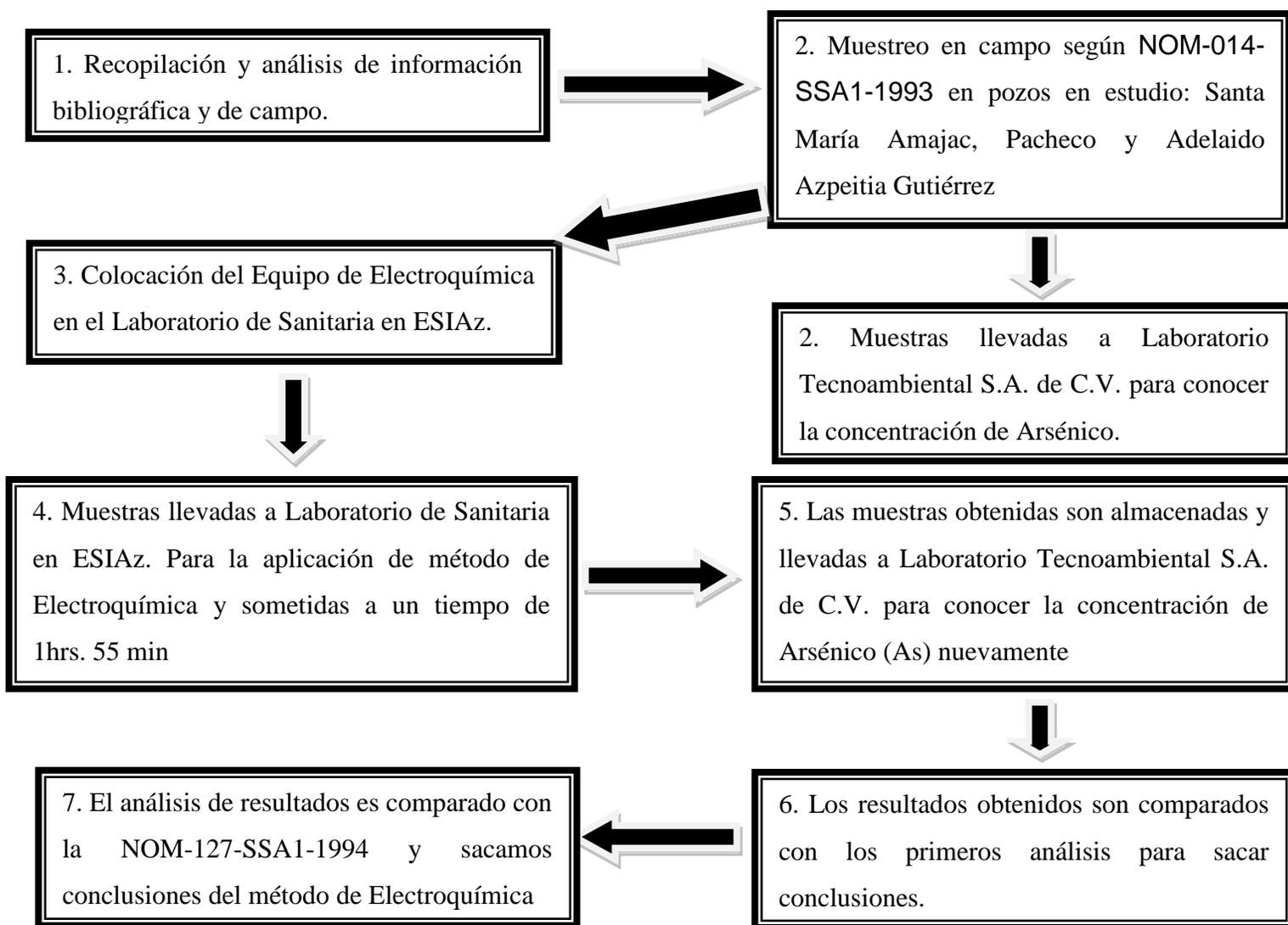


Fig. 26 Diagrama de flujo de la metodología realizada

CAPITULO VI: EXPERIMENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Experimentación

1.- Instalación del equipo de Electroquímica en el laboratorio.

La experimentación del proceso de Electroquímica se llevo a cabo en el Laboratorio de Sanitaria de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura en la unidad Zacatenco donde se explica la colocación del proceso por medio de las figuras 27 a la 36.

- Materiales: Batería tipo Charger de 6/12 volts marca MARQUETTE, cable blanco del N° 10, Pinzas de corte, cinta de aislar, placas de acero inoxidable (celdas), soportes con pinzas, vaso, probeta y pipeta graduada. Posteriormente se conecta y se hacen las primeras pruebas para ver su funcionamiento, teniendo la certeza de que funciona se procede a el experimento.

Secuencia de fotografías



Fig. 27 Se pesaron las placas de acero en báscula electrónica.



Fig.28 Se lavo el material de laboratorio.



Fig.29 Se lavo el material de laboratorio.



Fig.30 Se desinfecto el material de laboratorio con ayuda de una autoclave.



Fig.31 Se procedió a sacar el material de laboratorio desinfectado para su colocación



Fig.32 Se instala el material de laboratorio para el método de Electroquímica.



Fig.33 Se vacían las muestras en el vaso y se gradúan con ayuda de una pipeta



Fig.34 Se observa el método y se toman anotaciones de su funcionamiento.



Fig.35 Se muestra en la imagen la reacción que se está formando en el cátodo y ánodo.



Fig.36 El método funciona correctamente

7.2 Experimentación de la primera visita hecha el sábado 5/02/2011

Lunes 7 de febrero, tres muestras fueron llevadas a un laboratorio particular acreditado el cual se llama Tecnoambiental S.A. de C.V. para ratificar si efectivamente hay Arsénico en el agua subterránea de los tres pozos en estudio por el método de Absorción Atómica, ya que en la investigación teórica en el proyecto realizado en el 2008 por la Comisión Nacional del Agua en conjunto con La Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado, Subdirección General de Planeación y Tecnología del Agua, Dirección de Investigación y Desarrollo del Agua y Subdirección de Agua limpia se encuentran concentraciones de Arsénico (Capítulo III).

Al mismo tiempo fue puesto en marcha el experimento de electroquímica en el Laboratorio de Sanitaria de ESIAz. Con una carga de 6 volts y un tiempo de 1hrs, 55min. Fueron recogidas las muestras del Laboratorio particular con resultados positivos a la investigación ratificando la presencia de Arsénico (Tabla 19).

Tabla 19. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo uno del 5/02/2011(Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0357	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0242	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0210	0.05	DENTRO

Observaciones del primer muestreo:

- 1) Este experimento no se realizo por la contaminación de las muestras en el Laboratorio de Sanitaria.
- 2) Los resultados de Laboratorio antes mencionado fueron favorables para la investigación. (Se encontró una concentración considerable de Arsénico en dos pozos Santa María Amajac y Adelaido Azpeitia G. y en el pozo Pacheco también se encontró Arsénico con la concentración más baja de los tres.
- 3) Las muestras contaminadas ya no fueron enviadas al Laboratorio particular para su análisis y su comparación.

7.3 Experimentación de la segunda visita hecha el sábado 14/05/2011

Lunes 16 de Mayo, tres muestras fueron llevadas al Laboratorio particular (Tabla 20), para ratificar si efectivamente hay Arsénico en el agua subterránea de los tres pozos en estudio por el método de Absorción Atómica, ya conociendo los antecedentes del proyecto y del primer muestreo

Se puso en marcha el experimento de Electroquímica. Con una carga de 6 volts y un tiempo de 1hrs, 55min. Fueron recogidas las muestras del Laboratorio descrito anteriormente con resultados positivos a la investigación ratificando la presencia de Arsénico en el agua de los tres pozos.

Tabla 20. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo uno del 14/05/2011(Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V.)

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0342	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0251	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0282	0.05	DENTRO

Terminando el experimento de Electroquímica las muestras de los tres pozos fueron llevadas al Laboratorio particular para su análisis y su posterior comparación (Tabla 21).

Tabla 21. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo dos del 15/05/2011 después del Método de Electroquímica (Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO

Observaciones del segundo muestreo:

- 1) Los resultados de Laboratorio citado anteriormente fueron favorables para la investigación. Se encontró una concentración considerable de Arsénico en tres pozos Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia G. y pozo Pacheco, como muestra la Tabla 21.
- 2) Las muestras llevadas a Laboratorio particular donde el resultado fue positivo al disminuir la concentración de Arsénico.
- 3) Se efectuó al tercer muestreo para ratificar el método de Electroquímica en la eliminación Arsénico.

7.4 Experimentación de la tercera visita hecha el sábado 6/09/2011

Lunes 8 de Agosto, tres muestras fueron llevadas al Laboratorio antes mencionado para ratificar si efectivamente hay Arsénico en el agua subterránea de los tres pozos en estudio por el método de Absorción Atómica, ya conociendo los antecedentes del proyecto y del primer y segundo muestreo (Tabla 22).

Fue puesto en marcha el experimento de Electroquímica. Con una carga de 6 volts y un tiempo de 1hrs, 55min. Las muestras fueron recogidas del Laboratorio particular con resultados positivos a la investigación ratificando la presencia de Arsénico en el agua de los tres pozos.

Tabla 22. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo uno del 8/08/2011
(Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0339	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0265	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0272	0.05	DENTRO

Terminando el experimento de Electroquímica las muestras de los tres pozos fueron llevadas al Laboratorio antes mencionado para su análisis y su posterior comparación (Tabla 23).

Tabla 23. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo dos del 9/08/2011 después del Método de Electroquímica (Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO

Observaciones del tercer muestreo:

- 1) Los resultados de Laboratorio citado anteriormente fueron favorables para la investigación. Se encontró una concentración considerable de Arsénico en tres pozos Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia G. y pozo Pacheco.
- 2) Las muestras llevadas a Laboratorio particular donde el resultado es positivo al disminuir la concentración de Arsénico.
- 3) Se efectuó al cuarto y último muestreo para ratificar el método de Electroquímica en la eliminación Arsénico.

7.5 Experimentación de la cuarta visita hecha el sábado 14/01/2012

Lunes 16 de Enero, tres muestras fueron llevadas al Laboratorio particular para ratificar si efectivamente hay Arsénico en el agua subterránea de los tres pozos en estudio por el método de Absorción Atómica, ya conociendo los antecedentes del proyecto y del primer muestreo (Tabla 24).

Fue puesto en marcha el experimento de Electroquímica. Con una carga de 6 volts y un tiempo de 1hrs, 55min. Son recogidas las muestras del Laboratorio mencionado anteriormente con resultados positivos a la investigación ratificando la presencia de Arsénico en el agua de los tres pozos.

Tabla 24. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo uno del 14/01/2012
(Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0367	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0249	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	0.0274	0.05	DENTRO

Terminando el experimento de Electroquímica las muestras de los tres pozos fueron llevadas al Laboratorio particular para su análisis y su posterior comparación (Tabla 25).

Tabla 25. Resultado de las concentraciones de Arsénico del muestreo dos del 16/01/2012
después del Método de Electroquímica (Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V).

Pozo	Método Absorción Atómica	Unidades	Resultado	Norma	Observaciones
Santa María Amajac	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Adelaido Azpeitia G.	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO
Pacheco	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l	<0.0025	0.05	DENTRO

Observaciones del cuarto muestreo:

- 1) Los resultados de Laboratorio particular fueron favorables para la investigación. Se encontró una concentración considerable de Arsénico en tres pozos Santa María Amajac, Adelaido Azpeitia G. y pozo Pacheco,
- 2) Las muestras llevadas a Laboratorio antes mencionado lo cual muestran un resultado positivo al disminuir la concentración de As concluyendo que es eficaz el método de Electroquímica para su eliminación

CONCLUSIONES

- El Agua del pozo de Adelaido Azpeitia Gutiérrez, es apta para consumo humano según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, y al Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. donde fue analizado por el método de Absorción Atómica. Tuvo en sus cuatro análisis un promedio de 0.02518 mg/l, removiendo un 90.07% llegando a <0.0025 mg/l del límite de Detección del Método, que con los 0.05 de la norma no afecta al consumo humano, pero por su efecto de acumulación en el organismo se siguió con la investigación.
- El Agua del pozo de Santa María Amajac, es apta para consumo humano según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, y al Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. donde fue analizado por el método de Absorción Atómica. Tuvo en sus cuatro análisis un promedio de 0.03513 mg/l, removiendo un 92.88% llegando a <0.0025 mg/l del límite de Detección del Método, que con los 0.05mg/l de la norma no afecta al consumo humano, pero por su efecto de acumulación en el organismo se siguió con la investigación.
- El Agua del pozo de Pacheco, es apta para consumo humano según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, y al Laboratorio Tecnoambiental S.A. de C.V. donde fue analizado por el método de Absorción Atómica. Tuvo en sus cuatro análisis un promedio de 0.026 mg/l, removiendo un 90.38% llegando a <0.0025 mg/l del límite de Detección del Método, que con los 0.05mg/l de la norma no afecta al consumo humano, pero por su efecto de acumulación en el organismo se siguió con la investigación.
- El proceso de Electroquímica si es una viabilidad técnica para la reducción de la concentración de Arsénico en la captación de aguas subterráneas de los tres pozos en estudio del Municipio de San Salvador en el estado de Hidalgo.

RECOMENDACIONES

- El proceso de Electroquímica se propone después de la captación de agua subterránea en un tanque de almacenamiento para remover el Arsénico existente y posteriormente continuar con la cloración para la distribución a la comunidad.
- Se recomienda seguir con la investigación para saber el tiempo óptimo de la remoción del Arsénico ya que esta investigación demuestra cualitativamente que es eficiente el proceso de Electroquímica.
- Se recomienda seguir con la investigación hacia una viabilidad económica del proceso de Electroquímica ante otros procesos como Cuagulación/Filtración, Intercambio Iónico los cuales son los más usados en la remoción del Arsénico.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Albert, A.L., 1998. Curso básico de Toxicología Ambiental. Limusa-Noriega. D.F. México. pp.7-14 y 101 – 183.
- 2.- (ATSDR) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2007. Toxicological profile for arsenic. Draft for Public Comment. Atlanta: US Department of Health and Human Services. Available at URL: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.html>. Last accessed 1.14.08
- 3.-
 - Anuario Estadístico Hidalgo Edición 2000 [Gobierno del Estado de Hidalgo (Secretaría de Desarrollo Social) – INEGI].
 - Cédula Municipal Estado de Hidalgo, Dirección de Información para la Planeación.
 - Consejo Estatal de Ecología “Taller de Gestión y Vinculación Municipal 2000”, Gobierno del Estado de Hidalgo. Enero del 2000.
 - Cuaderno de Información Básica San Salvador, Estado de Hidalgo, Dirección General de Planeación, edición 2000.
 - Cuaderno Estadístico Municipal San Salvador, Estado de Hidalgo Edición 1994.
 - Diccionario de Abraham Pérez López.
 - Dr. José García Uribe, “Recorriendo el Estado de Hidalgo”, Edición México 1979.
 - Información General del Municipio.
 - Los Municipios de Hidalgo, edición 1987.
 - Los Municipios de México, Información para el Desarrollo. CEDEMUN, edición 1998.
- Monografía del Estado de Hidalgo, Instituto Hidalguense de la Cultura, tomo II , edición 1993.
- 4.- Bleecker M. Toxic Peripheral Neuropathy. 2007. In: Rom W and Markowitz S eds. Environmental and Occupational Medicine, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, page 643.
- 5.- Buchet JP, Lauwerys R, Roels H. 1981. Comparison of the urinary excretion of arsenic metabolites after a single dose of sodium arsenite, monomethylarsonate or dimethylarsinate in man. In Arch Occup Environ Health. 48:71-179.
- 6.- Caldwell KL, Jones RL, Verdon, CP, et. al., 2008. Levels of urinary total and speciated arsenic in the US population: National Health and Nutrition Examination Survey 2003-2004. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 1-10.
- 7.- Chakraborti D, Mukherjee SC, Saha KC, et. al. 2003a. Arsenic toxicity from homeopathic treatment. J Toxicol Clin Toxicol 41(7): 963-967.
- 8.- Chakraborti D, Hussam A, Alauddin M. 2003b. Arsenic: Environmental health aspects with special reference to ground water in South Asia. J Environ Sci Health Part A 38(1):xi-xv.
- 9.- Chang, Raymond (2007). «Electroquímica». *Química* (Novena Edición edición). McGraw Hill. pp. 1100. ISBN 0-07-298060-5.
- 10.- Chen CJ, Hsueh YM, Lai MS, et. al., 1995. Increased prevalence of hypertension and long-term arsenic exposure. Hypertension. 25:53-60.

- 11.- Cohen D and Moore M. Occupational Skin Disease. 2007. In: Rom W and Markowitz S eds. Environmental and Occupational Medicine, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, page 635.
- 12.- Datta DV. 1976. Arsenic and non-cirrhotic portal hypertension. Lancet 1:433.
- 13.- Dowdy and. Volk (1983) presented an excellent review of metal movement in soils amended with As, Cd, Cu, Fe, Pb, Zn. Mine tailings. Leaching and water monitoring/mineralogical.
- 14.- Enterline PE, Henderson VL, Marsh GM. 1987. Exposure to arsenic and respiratory cancer: a reanalysis. Am J Epidemiol 125:929-38.
- 15.- Eyssautier de la Mora, Maurice (2006) (en español). Metodología de la investigación: desarrollo de la inteligencia (5 edición). Cengage Learning Editores. pp. 97. ISBN 9706863842. http://books.google.co.ve/books?id=xdALJ4BXo_AC.
- 16.- Falk H, Caldwell GG, Ishak KG, et. al., 1981. Arsenic related hepatic angiosarcoma. Am J Ind Med 2:43-50.
- 48.- Enterline PE, Henderson VL, Marsh GM. 1987. Exposure to arsenic and respiratory cancer: a reanalysis. Am J Epidemiol 125:929-38.
- 17.-Fergusson, PP. 1990. Arsenic and atherosclerosis. Toxicol Appl Pharmacol. 128:270-275.
- 18.- Foa V, Colombi A, Maroni M. 1984. The speciation of the chemical forms of arsenic in the biological monitoring of exposure to inorganic arsenic. Sci Total Environ. 34:241-259.
- 19.- Garb LG, Hine CH. 1977. Arsenical neuropathy: residual effects following acute industrial exposure. J Occup Med. 19567-568.
- 20.- García Andrade, David Gabriel.(2008) Manual de laboratorio de Físicoquímica de los Materiales. Universidad Autónoma Metropolitana.
- 21.- Gerencia de Aguas Subterráneas, Subdirección General Técnica. Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea, "Contaminación de agua Subterránea" (II parte), noviembre 2000.
- 22.- Gorb MS. Arsenic poisoning. West J Med 1988;149:308-315.
- 23.- Gorb-Picciotto I y Hine AM, Hu SW. 1977. Does arsenic exposure increase the risk for circulatory disease? Am J Epidemiol. 151:174-181.
- 24.- Garvey GJ, Hahn G, Lee RV, et. al., 2001. Heavy metal hazards of Asian traditional remedies. Int J Environ Health Res 11(1):63-71.
- 25.- Giberson A, Vaziri ND, Mirahadi K, et. al., 1976. Haemodialysis of acute arsenic intoxication with transient renal failure. Arch Intern Med. 136:1303-1304.
- 26.- Hsueh YM, Cheng GS, Wu MM, et. al., 1995. Multiple risk factors associated with arsenic-induced skin cancer: effects of chronic liver disease and malnutritional status. Br J Cancer. 71:109-114.
- 27.- <http://campohidalguense.gob.mx/sansalvador/>
- 28.- INSHT (2003), Accidentes graves frecuentes en la manipulación de sustancias peligrosas. Medidas básicas de prevención, en ERGA, n.º 78, ISSN 213-7658, España, p. 4 [21-1-2008]
- 29.- Ishinishi N, Tsuchiya K, Vahter M, Fowler BA. 1986. Arsenic. In: Friberg L, Nordberg GF, Vouk V, eds. Handbook on the toxicology of metals. Amsterdam: Elsevier Science.

- 30.- (IARC) International Agency for Research on Cancer. 2004. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Some Drinking Water Disinfectant and Contaminants, Including Arsenic. Vol. 84. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
- 31.- Lansdown AB. 1995. Physiological and toxicological changes in the skin resulting from the action and interaction of metal ions. *Crit Rev Toxicol.* 25:397-462.
- 32.- Lugo G, Cassidy G, Palmisano P. 1969. Acute maternal arsenic intoxication with neonatal death. *Am J Dis Child* 117:328-330.
- 33.- Metcalf and Eddy (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, p. 1. 3 Ver apéndice A. 4 Metcalf and Eddy (1991). *Wastewater Engineering:*
- 34.- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su potabilización"
- 35.- Monografía del Estado de Hidalgo, Instituto Hidalguense de la Cultura, tomo II, edición 1993. (MEH, IHDEC 1993).
- 36.- Murunga E and Zawada E. 2007. Environmental and Occupational Causes of Toxic Injury to the Kidneys and Urinary Tract. In: Rom W and Markowitz S eds. *Environmental and Occupational Medicine*, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, page 810.
- 37.- Murphy MJ, Lyon LW, Taylor JW. 1981. Subacute arsenic neuropathy: clinical and electrophysiological observations. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 44:896-900.
- 38.- Naveira, Alicia Alba (2008). «Corrosión». *Química Inorgánica para estudiantes de ingeniería química (Tercera Edición edición)*. Editorial Ceit. pp. 278. ISBN 978-987-1063-10-9.
- 39.- (NAS) National Academy of Sciences. 1977. Medical and biologic effects of environmental pollutants, arsenic. Washington, DC: National Research Council, National Academy of Sciences, 1977.
- 40.- (NRC) National Research Council. 2000. *Arsenic in Drinking Water*. Washington, DC: National Academy Press.
- 41.- Popper H, Thomas LB, Telles NC, et. al., 1978. Development of hepatic angiosarcoma in man induced by vinyl chloride, Thorotrast and arsenic. *Am J Pathol.* 92:349-376.
- 42.- PROFEPA 2002, www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html
- 43.- reacciones de oxido-reducción y electroquímica
<http://www.fq.uh.cu/dpto/qf/uclv/infoLab/practics/practicas/Electrolisis/celdas/electroq2.pdf>
- 44.- Rossman T. 2007. Arsenic. In : Rom W and Markowitz S eds. *Environmental and Occupational Medicine*, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, pp1006-1017.
- 45.- Rose M, Lewis J, Langford N, Baxter M, Origgi S, Barber M, et al. July 2007. Arsenic in seaweed-Forms, concentration and dietary exposure. *Food and Chemical Toxicology*. Volume 45, Issue 7: 1263-1267.
- 46.- (Semarnat, CNA. Editado en Agua.org.mx)
http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=section&id=6&Itemid=282.-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Estadísticas del agua en México*, México, 2007.
-

http://www.imta.mx/index.php?Itemid=106&catid=52:enciclopedia-del-agua&id=181:agua-subterranea&option=com_content&view=article

- 47.- Sexton GB, Gowdey CW. 1963. Relation between thiamine and arsenic toxicity. Arch Dermatol Syph. 56:634-647.
- 48.- Shalat SL, Walker DB, Finnell RH. 1996. Role of arsenic as a reproductive toxin with particular attention to neural tube defects. J Toxicol Env Hlth 48(3):253-72.
- 49.- (SEMARNAT, Estadística del agua en México, México 2011).
- 50.- World Health Organization (WHO). Arsenic and Arsenic Compounds, 2nd edn. Environmental Health Criteria 224. Geneva 2001. (accessed Apr. 2 2008).
<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc224.htm>
- 51.-. www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/.../SGP-1-11-EAM2011.pdf
- 52- Yip L, Dart R. 2001. Arsenic in: Sullivan J and Kreiger G, eds. Clinical Environmental Health and Toxic Exposures, Second Edition. Philidelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins. Pp 858-865.
- 53.- Simeonova PP, Luster MI. 2004. Arsenic and atherosclerosis. Toxicol Appl Pharmacol. 198:444-449.
- 54.- Young T, Finn L, Hla KM, Morgan B, Palta M. 1996. Department of Preventive Medicine, University of Wisconsin-Madison
- 55.- Zaldivar R, Prunes L, Ghai GL. 1981. Arsenic dose in patients with cutaneous carcinomata and hepatic haemangio-endothelioma after environmental and occupational exposure. Arch Toxicol. 47:145-154.