

# Hacia el cumplimiento del **Derecho Humano al Agua**

Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la **sociedad civil y la academia en México.**

## **Compilación y coordinación de la edición**

Luz María Del Razo, Juan Manuel Ledón y Mónica N. Velasco

## **Coordinación de capítulos**

Ma. Aurora Armienta, Ma. Catalina Alfaro de la Torre, Ma. Teresa Alarcón Herrera y Alejandra Martín Domínguez



---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México

Tomo I serie Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua

# Hacia el cumplimiento del **Derecho Humano al Agua**

Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la **sociedad civil y la academia en México.**



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Dr. Enrique Graue Wiechers       | Rector   |
| Dr. Leonardo Lomelí Vanegas      | Secretario General   |
| Dra. Mónica González Contró      | Abogada General  |
| Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez    | Secretario Administrativo                                    |
| Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa   | Secretario de Desarrollo Institucional                       |
| Lic. Raúl Arcenio Aguilar Tamayo | Secretario de Prevención, Atención y Seguridad Universitaria |
| Dr. William Henry Lee Alardín    | Coordinador de la Investigación Científica                   |

## INSTITUTO DE GEOFÍSICA

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Dr. José Luis Macías Vázquez    | Director   |
| Dr. Luis Quintanar Robles       | Secretaria Académica                               |
| Ing. Edgar García López         | Secretaria Técnica                                 |
| Lic. Vanessa Ayala Perea        | Secretaria Administrativa                          |
| Lic. Claudia N. Menéndez Gudiel | Secretario de Gestión y Vinculación                |
| Dra. Christina Siebe Grabach    | Coordinadora del Posgrado en Ciencias de la Tierra |

## EQUIPO EDITORIAL

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Dr. Peter Schaaf              | Editor invitado                                    |
| Dr. Jaime Yamamoto Victorio   | Editor académico                                   |
| Mtra. Andrea Rostan Robledo   | Editores técnica                                   |
| Lic. Vanesa Lizet Gómez Vivas | Formato electrónico                                |
| Mtra. Natalia Rentería Nieto  | Adaptación de diseño editorial y diseño de portada |



# ARSÉNICO Y FLUORURO EN AGUA: RIESGOS Y PERSPECTIVAS DESDE LA SOCIEDAD CIVIL Y LA ACADEMIA EN MÉXICO

Tomo I serie Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua

## **Compilación y coordinación de la edición:**

Luz María Del Razo, Juan Manuel Ledón y Mónica N. Velasco

## **Coordinación de capítulos:**

Ma. Aurora Armienta, Ma. Catalina Alfaro de la Torre, Ma. Teresa Alarcón Herrera y Alejandra  
Martín Domínguez

**México, 2021**

Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México - - 1ª Ed. - - Ciudad de México, UNAM-Instituto de Geofísica, 2021: Hacia el cumplimiento del derecho humano al agua  
200, pp.: il., maps., fots. formato electrónico.

ISBN colección 978-607-30-4772-2

ISBN volumen 978-607-30-4773-9

---

Edición: Andrea Rostan Robledo  
Diseño: Natalia Rentería Nieto  
Formato electrónico: Vanesa Lizet Gómez Vivas

Primera edición: 2021 DR. ©

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Av. Universidad No. 3000, Col. UNAM, C.U., Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán,  
Código Postal 04510, Ciudad de México.

ISBN colección 978-607-30-4772-2

ISBN volumen 978-607-30-4773-9

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio, sin autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

# CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| PRÓLOGO.   | 9         |
| PREFACIO.  | 11        |
| AGRADECIMIENTOS.   | 13        |
| DIRECTORIO DE AUTORES DEL LIBRO.   | 15        |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.</b>  | <b>19</b> |
| <b>PANORAMA DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO EN MÉXICO.</b> <i>María Deogracias Ortiz Pérez.</i>  | 19        |
| <b>SITUACIÓN DE LA PRESENCIA DE ARSÉNICO Y FLUORURO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO.</b> <i>María Aurora Armienta, Antonio Cardona, Israel Labastida, Catalina Alfaro de la Torre y María de Lourdes Ballinas Casarrubias.</i>   | 23        |
| <b>2. INVENTARIO NACIONAL DE CALIDAD DEL AGUA.</b>   | <b>33</b> |
| <b>BASES Y ANTECEDENTES DE LA INICIATIVA INCA.</b> <i>Juan Manuel Ledón.</i>   | 33        |
| <b>SITUACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO.</b> <i>María Catalina Alfaro de la Torre, María Aurora Armienta y María Deogracias Ortiz Pérez.</i>  | 37        |
| <b>CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO Y FLUORURO EN AGUA SUBTERRÁNEA.</b> <i>María Catalina Alfaro de la Torre, María Deogracias Ortiz Pérez, María Teresa Alarcón, Diego Armando Martínez Cruz y Juan Manuel Ledón.</i>  | 40        |
| <b>3. IMPACTO EN LA SALUD PÚBLICA.</b>   | <b>59</b> |
| <b>EFFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A ARSÉNICO.</b> <i>María Eugenia Gonsebatt y Luz María Del Razo.</i>  | 59        |
| <b>EFFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A FLUORURO.</b> <i>Mónica I. Jiménez Córdova, Mariana Cárdenas González y Olivier C. Barbier.</i>   | 65        |
| <b>ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO RELACIONADOS A LA EXPOSICIÓN DE ARSÉNICO Y FLUORURO.</b> <i>Mónica I. Jiménez Córdova, Mariana Cárdenas González, María Deogracias Ortiz Pérez, y Luz María Del Razo.</i>   | 70        |
| <b>NECESIDAD DE DATOS Y SU VISIBILIDAD.</b> <i>Mónica I. Jiménez Córdova y Mariana Cárdenas González.</i>  | 79        |
| <b>PROSPECTIVA DE LA SITUACIÓN: ¿CUÁLES SERÍAN LAS CONSECUENCIAS POTENCIALES DE LA NO-ACCIÓN?</b> <i>MARIANA CÁRDENAS GONZÁLEZ Y MARÍA EUGENIA GONSEBATT</i>   | 81        |
| <b>4. TECNOLOGÍAS Y AVANCES CIENTÍFICOS.</b>   | <b>83</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN A SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN Y PROCESOS DE TRATAMIENTO.</b> <i>María Teresa Alarcón Herrera y Alejandra Martín Domínguez.</i>  | 83        |
| <b>ESTUDIOS EN LABORATORIO.</b> <i>María Teresa Alarcón Herrera, Alejandra Martín Domínguez, María de Lourdes Rivera Huerta, Sara Pérez Castrejón, Iván Emmanuel Villegas Mendoza, Liliana Reynoso Cuevas, María Aurora Armienta Hernández, Israel Labastida Núñez, Mario Alberto Olmos Márquez y María Cecilia Valles Aragón.</i> | 87        |
| <b>ESTUDIOS PILOTO PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO.</b> <i>Alejandra Martín Domínguez e Iván Emmanuel Villegas Mendoza.</i>  | 94        |
| <b>PLANTAS CENTRALIZADAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO.</b> <i>Antonio Javier García López, Arturo González Herrera, Iván Emmanuel Villegas Mendoza y Martín Piña Soberanis.</i>   | 99        |

|   |     |
|---|-----|
| TECNOLOGÍAS A ESCALA DOMÉSTICA. <i>Martin Piña Soberanis, Caminos de Agua y Grupo EoZ S.A. de C.V.</i>  | 103 |
| <b>5. CASOS DE ESTUDIO Y EXPERIENCIAS EN CAMPO.</b>   | 107 |
| <b>CASO LA LAGUNA.</b> <i>Irais Poblete-Naredo, José Javier García-Salcedo, Juan E. Salinas-Aguirre, Rogelio O. Corona-Núñez y Arnulfo Albores.</i>   | 107 |
| <b>CASO DE ESTUDIO EN LA LAGUNA: PLANTAS POTABILIZADORAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO.</b> <i>Arturo González Herrera y Antonio Javier García López.</i>   | 116 |
| <b>CASO ZIMAPÁN, HIDALGO.</b> <i>María Aurora Armienta y Luz María Del Razo.</i>  | 119 |
| <b>CASO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.</b> <i>María Deogracias Ortiz Pérez, Mária Catalina Alfaro de la Torre, Ana Cristina Cubillas Tejeda, Mauricio León Arce y Lorena Anaya González.</i>                              | 125 |
| <b>CASO DEL ESTADO DE GUANAJUATO.</b> <i>Mariana Cárdenas González, Dylan Terrell, Casilda Barajas Rocha e Iván Morales Arredondo.</i>  | 134 |
| <b>CASO DEL ESTADO DE CHIHUAHUA.</b> <i>María de Lourdes Ballinas-Casarrubias, Juan Antúnez, María del Carmen González-Horta, Blanca Sánchez-Ramírez y Luz María Del Razo.</i>  | 141 |
| <b>CASO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR.</b> <i>Janette M. Murillo-Jiménez, Laura Arreola-Mendoza, Ana J. Marmolejo-Rodríguez y Flor Cassassuce.</i>  | 146 |
| <b>EVALUACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN COMUNIDADES RURALES (PROSSAPYS) CÁNTARO AZUL – BID.</b> <i>Mónica N. Camacho-Galván y Fermín Reygadas Robles Gil.</i> | 151 |
| <b>6. VOCES Y TESTIMONIOS DE LA CIUDADANÍA Y LA SOCIEDAD CIVIL.</b> <i>Juan Manuel Ledón, Gibrán Mena, Alejandra Fonseca, Mauricio León y Mariana Cárdenas.</i>   | 153 |
| <b>7. OPORTUNIDADES</b>   | 161 |
| <b>AGUA DE LLUVIA.</b> <i>Dylan Terrell, Casilda Barajas Rocha, Arturo González Herrera, Nabani Vera, Yoselin Becerril Fuentes, Tirian Mink y Paloma Mejía Lechuga.</i>   | 161 |
| <b>EDUCACIÓN Y COMUNICACIÓN AMBIENTAL.</b> <i>María Teresa Gutiérrez; Alejandra Fonseca; Mauricio León Arce; Juan Manuel Casanueva y Gibrán Mena.</i>   | 168 |
| <b>RESTAURACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS: LA EXPERIENCIA EN LA SUBCUENCA ALTA DEL RIO DE LA LAJA, GUANAJUATO.</b> <i>Agustín Madrigal Bulnes y Gerardo Ruíz Smith.</i>  | 173 |
| <b>DATOS ABIERTOS E INICIATIVAS.</b> <i>Mónica Nayeli Velasco-Estudillo, Octavio Aguirre, Juan Manuel Casanueva y Claudia Coronel Enriquez.</i>   | 179 |
| <b>REDES COLABORATIVAS DE CONOCIMIENTO EN SEGURIDAD HÍDRICA.</b> <i>Mónica Nayeli Velasco-Estudillo.</i>  | 184 |
| <b>8. RECOMENDACIONES.</b>  | 187 |
| <b>RECOMENDACIONES A LA CIUDADANÍA Y A LA SOCIEDAD CIVIL.</b>   | 187 |
| <b>RECOMENDACIONES A LA ACADEMIA.</b>   | 189 |
| <b>RECOMENDACIONES A ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.</b>   | 192 |
| <b>RECOMENDACIONES A LAS AUTORIDADES Y TOMADORES DE DECISIONES.</b>   | 193 |
| <b>9. REFLEXIONES FINALES.</b>  | 195 |

## PRÓLOGO

El consumo de agua es un derecho al que toda persona en nuestro país debe de tener acceso para satisfacer sus necesidades personales y domésticas de acuerdo con nuestra Constitución Política. En teoría, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, cerca del 92% de la población tiene acceso a este recurso con su debida cloración para consumo en nuestras viviendas. Esto quiere decir que esta agua ha sido tratada para eliminar elementos patógenos que afecten nuestra salud. Desafortunadamente, el agua que llega a nuestras viviendas no ha sido estudiada para identificar otros componentes orgánicos e inorgánicos que pueden dañar nuestra salud a mediano y largo plazo. No podemos negar que ha existido un esfuerzo importante en los órganos de gobierno (municipal, estatal y federal) primero para llevar el agua a nuestros domicilios y segundo para potabilizarla para nuestro consumo. Sin embargo, a la luz de los estudios que han venido realizando diversas instituciones académicas del país durante las últimas décadas estos esfuerzos resultan insuficientes para determinar con certeza si la calidad del agua que recibimos diariamente es adecuada. ¿Usted se ha preguntado si el agua que consume en su casa aún después de pasarla por un filtro está completamente limpia de contaminantes que dañen su salud? Desafortunadamente no lo podemos saber y solamente a través de un análisis químico podríamos tener una respuesta clara y la certeza absoluta de su contenido. Es por eso que esta obra “Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua” reviste una gran importancia porque en ella se conjuntan sesenta académicos que analizan la información con la que contamos en México enfocada a dos de los principales contaminantes (fluoruro y arsénico) que ponen en riesgo la salud en el país y además ponen sobre la mesa la situación que vivimos actualmente.

El problema del abasto del agua y su calidad es muy distinto de acuerdo a la localidad en la que vivimos. Esto tiene que ver con el tipo de clima de la región, la precipitación anual que recibe, su acidez (pH), salinidad, medio geológico, temperatura, etc. El agua que utilizamos para beber proviene en un 58% del subsuelo, esto quiere decir que es extraída de las rocas que se encuentran a cientos de metros o kilómetros por debajo de nuestras ciudades. Esta agua subterránea proviene de la infiltración del agua de lluvias a través del suelo y que debido a la permeabilidad de las rocas y a fallas o fracturas permite que transite a profundidad. El agua en su tránsito hacia el subsuelo disuelve minerales hasta llegar a un sitio en donde se acumula en una capa o varias capas de roca permeables llamadas acuífero. Seguramente nos imaginamos que este proceso de infiltración y acumulación del agua tomará días, pero en realidad puede tener grandes variaciones y llegar a decenas a miles de años dependiendo de la ubicación a profundidad del acuífero. En muchos de nuestros municipios y ciudades del país estamos en busca de acuíferos, una vez ubicados perforamos un pozo para extraer el agua y potabilizarla para nuestro consumo. Sin embargo, no sabemos qué minerales y/o elementos químicos el agua fue capaz de lixiviar o disolver de las rocas y si estos elementos son o no dañinos para nuestra salud. ¿Qué elementos químicos pudo haber disuelto el agua que consumimos en nuestros hogares? ¿En qué municipios del país podríamos tener problemas con el consumo de agua? ¿Cómo podemos saberlo y evitar daños a nuestra salud? Este libro nos presenta una compilación exhaustiva de los estudios que se han realizado durante las últimas décadas en territorio nacional enfocados a dos elementos que pueden dañar nuestra salud. Los autores enmarcan de una manera muy clara y objetiva los principales problemas que enfrentamos en nuestro país en el consumo de agua e identifican que tanto el arsénico como el fluoruro representan un peligro para nuestra salud al estar disueltos en el agua que se consume en 178 municipios de 23 estados del país. Es cierto que la concentración de ambos contaminantes debe sobrepasar cierta cantidad para que pueda afectar nuestra salud. Deberíamos de preguntarnos si ¿Nuestro hogar se encuentra en uno de estos municipios? ¿El agua que consumimos es realmente potable? ¿Cómo podemos saberlo? ¿Cuáles son los efectos de altas concentraciones de fluoruro y arsénico en

nuestro organismo? En este libro los autores nos dan respuesta a muchas de estas preguntas y nos resuelven muchas dudas adicionales que tienen que ver con las propiedades del agua, su composición, las concentraciones y orígenes de estos elementos en diversas localidades del país, así como las posibles alternativas para evitar que los pobladores estén expuestos a estos elementos y las respuestas que han dado diversas comunidades a esta problemática

Para el Instituto de Geofísica y la Universidad Nacional la publicación de esta obra representa un avance trascendental e imprescindible porque contextualiza de manera clara y objetiva el estado actual del estudio de las aguas (subterráneas y superficiales) y sus procesos de contaminación en el país. No puedo omitir, el agrado que representa ver reunidos en esta obra a tantos especialistas de varias instituciones del país que están a la vanguardia en el tema tanto en conocimientos como en laboratorios especializados. La búsqueda, extracción y el suministro de agua potable para el consumo de la población en México es sin duda un problema de índole Nacional que requiere urgentemente de la atención de todos nosotros.

A pesar de los avances conseguidos en los últimos años y los estudios que los diferentes autores nos presentan en este libro, también nos actualizan sobre la falta de estudios detallados de los contaminantes del agua en el país y de la urgente necesidad de tener un cubrimiento del territorio para definir con mayor precisión la carencia de análisis del agua en todo el territorio nacional. Los resultados, recomendaciones y el alcance de esta obra son un llamado para que la sociedad civil, nuestras autoridades, instituciones gubernamentales y académicas tengamos una conciencia muy clara de la problemática que estamos viviendo en México y enfoquemos nuestros esfuerzos para cumplir como bien lo enmarca el título de este trabajo con el Derecho Humano al Agua. Estoy seguro que esta segunda edición del libro representará un antes y un después no solo en los estudios del agua y sus contaminantes sino, sobre todo, en nuestras conciencias e interés por cuidar este recurso tan preciado para la vida en nuestro planeta.

José Luis Macías Vázquez

## PREFACIO

El objetivo de este libro es divulgar, sensibilizar, generar conciencia, así como ofrecer alternativas y recomendaciones para atender, prevenir y mitigar los efectos en la salud y el medio ambiente relacionados a la problemática del arsénico y fluoruro en el agua.

El libro es un esfuerzo colectivo de 60 autores del sector académico, científico, de sociedad civil y emprendimiento socioambiental en México. Está conformado por nueve capítulos. El primero ofrece un panorama actual acerca de la presencia de arsénico y fluoruro en el agua, su origen y magnitud de exposición a nivel nacional.

El segundo capítulo describe las bases de la iniciativa INCA (Inventario Nacional de Calidad del Agua) desarrollada por la red de colaboración de la CHMAS; presenta la situación y los niveles de concentración de arsénico y fluoruro en agua subterránea por estado, municipio y localidad en México. Estos datos buscan facilitar la identificación de zonas y localidades prioritarias, generar alertas y detonar medidas de atención a las poblaciones en situación de riesgo y vulnerabilidad.

El tercer capítulo presenta el impacto a causa de la exposición al arsénico, el cual se reconoce como un “veneno” con serios efectos en la salud; así como de la exposición al fluoruro, la cual aún no es percibida –en lo general- como un grave problema para la salud pública.

En el cuarto capítulo se describen tecnologías alternativas y avances científicos para el tratamiento y la remoción del arsénico y fluoruro del agua, a escala doméstica o centralizada, adecuadas a las condiciones de las comunidades urbanas y rurales.

En el capítulo quinto se narran casos de estudio y experiencias en campo de zonas o regiones emblemáticas del país, los cuales describen el problema en distintos contextos; y presentan aspectos positivos y negativos de las acciones y los esfuerzos realizados con el ánimo de que pueden ser emulados o evitados.

El capítulo sexto ofrece una visión sensible desde la perspectiva de la ciudadanía y la sociedad civil, a partir de voces y testimonios de personas directamente relacionadas a la problemática de contaminación por arsénico y fluoruro en el agua subterránea.

El capítulo séptimo se orienta a las oportunidades que ofrecen el aprovechamiento del agua de lluvia; la educación y comunicación ambiental; la restauración de ecosistemas; el uso de datos abiertos e iniciativas; y las redes de colaboración; las cuales representan una visión esperanzadora en la búsqueda de soluciones efectivas, integrales, replicables y sostenibles.

En el capítulo octavo se brindan recomendaciones dirigidas a la ciudadanía y a la sociedad civil; a la academia; a los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento; así como a las autoridades y tomadores de decisiones.

Por último, en el capítulo noveno se comparten las reflexiones finales por parte de algunos de los autores y participantes de esta obra. Más que establecer conclusiones, se busca que este libro contribuya a despertar conciencia e interés, inspirar e iniciar un nuevo camino hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua en México.

Titular de la Subsecretaría de Prevención y Participación Ciudadana de la SEGOB



## AGRADECIMIENTOS

A Pury, por sus años de compromiso y perseverancia para visibilizar la problemática de la calidad del agua en México, y la motivación a sumarnos a su causa. A Luz María Del Razo, Juan Manuel Ledón y Mónica N. Velasco por la compilación y coordinación general. A los coordinadores de capítulos Aurora Armienta, Catalina Alfaro, Teresa Alarcón Herrera y Alejandra Martín Domínguez. A Dylan Terrell y Caminos de Agua por coordinar el trabajo en campo. Al padre Juan Carlos Zesati por su ejemplo e inspiración. A Gabriela Soriano por el diseño de la portada. A la Red de Salud Ambiental Infantil por acompañarnos durante el proceso. A Humberto Muñoz Grandé por la revisión de estilo.

Agradecemos a todas las personas e instituciones que contribuyeron a la realización de esta obra. En particular al Mtro. Julio Cesar Vanegas Guzmán, extitular de la Unidad de Desarrollo Político y Fomento Cívico de la Secretaría de Gobernación; a la red de colaboración de la Comisión de Hábitat, Medio Ambiente y Sostenibilidad (CHMAS); a Fermín Reygadas Robles Gil, Presidente de la CHMAS y a los integrantes del Mecanismo de Colaboración entre las Organizaciones de la Sociedad Civil y el Gobierno Federal.

A los 60 autores por sus valiosas aportaciones. A los investigadores de CICIMAR y CIIEMAD del Instituto Politécnico Nacional; CIMAV Unidades Chihuahua y Durango; CINVESTAV-México, CONACYT-UAM-Azcapotzalco; Harvard Medical School; Instituto de Geofísica e Instituto de Geografía de la UNAM; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH); Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidades Azcapotzalco e Iztapalapa; y Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). A la Gerencia de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y a la red de investigación y colaboración del INCA.

A los integrantes y representantes de Caminos de Agua; Cántaro Azul; Centro Comunitario San Cayetano; Consorcio Académico Niño, Casa, Ambiente y Salud (CANICAS); Ecología y Comunidad Sustentable (ECOS); Equipo Pueblo; El Maíz Más Pequeño; Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental; Iniciativa Agua para Tod@s Agua para la Vida; Grupo EOZ - Instituto de Tecnologías Rurales; Isla Urbana; Neta Cero; Organización para Restaurar el Medio Ambiente y la Armonía Social (ORMA); Salvemos al Río Laja; SocialTIC; Watakame; además de los ciudadanos que participaron.



## DIRECTORIO DE AUTORES DEL LIBRO

### **AGUIRRE LOZANO, OCTAVIO**

Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México, Enlace PROTAI, CDMX, México.

*octavio.aguirre@gmail.com*

### **ALARCÓN HERRERA, MARÍA TERESA**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados A.C, Unidad Durango, Durango, México.

*teresa.alarcon@cimav.edu.mx*

### **ALBORES MEDINA, ARNULFO**

Departamento de Toxicología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), CDMX, México

*aalbores@cinvestav.mx*

### **ALFARO DE LA TORRE, MARÍA CATALINA**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP.

*alfaroca@uaslp.mx*

### **ANAYA GONZÁLEZ, LORENA**

Organización para Restaurar el Medio Ambiente y la Armonía Social, A.C, SLP, México

*orma.ac.proyectos@gmail.com*

### **ANTÚNEZ PRIETO, JUAN**

Ecología y Comunidad Sustentable, A. C. Chihuahua, Chihuahua, México.

*antunezja@ecosac.org*

### **ARMIENTA HERNÁNDEZ, MARÍA AURORA**

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

*victoria@geofisica.unam.mx*

### **ARREOLA MENDOZA, LAURA**

Departamento de Biociencias e Ingeniería, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.

*larreola@ipn.mx*

### **BALLINAS-CASARRUBIAS, MARÍA DE LOURDES**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

*mballinas@uach.mx*

### **BARAJAS ROCHA, CASILDA**

Caminos de Agua, San Miguel Allende, Guanajuato, México.

*casilda@caminosdeagua.org*

### **BARBIER, OLIVIER CHRISTOPHE**

Departamento de Toxicología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.

*obarbier@cinvestav.mx*

### **BECERRIL FUENTES, YOSELÍN**

Neta Cero, A. C., CDMX, México.

*yoselin@netacero.com*

### **CAMACHO-GALVÁN, MÓNICA N.**

Fundación Cántaro Azul, A.C., CDMX, México.

*monica@cantaroazul.org*

### **CAMINOS DE AGUA**

San Miguel Allende, Guanajuato, México

*https://caminosdeagua.org/*

**CASANUEVA VARGAS, JUAN MANUEL**

SocialTIC, A.C., CDMX, México.

*juan.casanueva@socialtic.org*

**CASSASSUCE, FLORENCE**

Empresa EOZ Filtros de Agua, La Paz, Baja California Sur, México.

*flor@grupoeoz.com*

**CÁRDENAS GONZÁLEZ, MARIANA**

Renal Division, Brigham and Women's Hospital, Harvard Institute of Medicine, Boston, MA. EUA

*mariana\_cardenasgonzalez@hms.harvard.edu*

**CARDONA BENAVIDES, ANTONIO**

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP.

*acardona@uaslp.mx*

**CORONA-NÚÑEZ ROGELIO O.**

Procesos y Sistemas de Información en Geomática, S.A. de C.V., Tlalnepantla, Estado de México, México.

*rogelio.corona@sigeomatica.com*

**CORONEL ENRÍQUEZ, CLAUDIA**

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Métodos Cuantitativos, Instituto Mora, CDMX, México

*ccoronel@institutomora.edu.mx*

**CUBILLAS TEJEDA, ANA CRISTINA**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. SLP, México.

*acubillast@yahoo.com*

**DEL RAZO JIMÉNEZ, LUZ MARÍA**

Departamento de Toxicología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), CDMX, México.

*ldelrazo@cinvestav.mx*

**FONSECA VELÁZQUEZ, REYNA ALEJANDRA**

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, CDMX, México.

*redes@agua.org.mx*

**FUNDACIÓN CÁNTARO AZUL, A.C.**

San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.

<https://www.cantaroazul.org>

**GARCÍA LÓPEZ, ANTONIO JAVIER**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.

*javier\_garcia@tlaloc.imta.mx*

**GARCÍA-SALCEDO, JOSÉ JAVIER**

Departamento de Farmacología, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Coahuila. Torreón, Coahuila, México.

*jjgs2000@yahoo.com*

**GONSEBATT BONAPARTE, MARÍA EUGENIA**

Departamento de Medicina Genómica y Toxicología Ambiental, Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

*margen@unam.mx*

**GONZÁLEZ HERRERA, ARTURO**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.

*argonzal@tlaloc.imta.mx*

**GONZÁLEZ-HORTA, MARÍA DEL CARMEN**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

*carmengonzalez@uach.mx*

**GRUPO EOZ, S.A. DE C.V**

La Paz, Baja California Sur, México.  
<https://www.agualimpia.mx>

**GUTIÉRREZ M., MARÍA TERESA**

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., CDMX, México  
[teresa@fcea.org.mx](mailto:teresa@fcea.org.mx)

**JIMÉNEZ CÓRDOVA, MÓNICA IVETTE**

Departamento de Toxicología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.  
[mijimenez@cinvestav.mx](mailto:mijimenez@cinvestav.mx)

**LABASTIDA NÚÑEZ, ISRAEL**

Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, CDMX, 02200  
[iln@azc.uam.mx](mailto:iln@azc.uam.mx)

**LEDÓN ROIG, JUAN MANUEL**

Coordinación de la Comisión de Hábitat, Medio Ambiente y Sostenibilidad  
EcoSite - Fundación Cántaro Azul, A.C., CDMX, México.  
[juanmanuel@cantaroazul.org](mailto:juanmanuel@cantaroazul.org)

**LEÓN ARCE, MAURICIO**

Organización para Restaurar el Medio Ambiente y la Armonía Social, A.C, SLP, México.  
[leon.arce.mauricio@gmail.com](mailto:leon.arce.mauricio@gmail.com)

**MADRIGAL BULNES, AGUSTÍN**

Salvemos el Río Laja, A.C., San Miguel de Allende, Guanajuato, México.  
[amabulnes@hotmail.com](mailto:amabulnes@hotmail.com)

**MARMOLEJO RODRÍGUEZ, ANA JUDITH**

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México.  
[amarmole@ipn.mx](mailto:amarmole@ipn.mx)

**MARTÍN DOMÍNGUEZ, ALEJANDRA**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.  
[alejandra\\_martin@tlaloc.imta.mx](mailto:alejandra_martin@tlaloc.imta.mx)

**MARTÍNEZ CRUZ, DIEGO ARMANDO**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Durango, Durango, México.  
[diego.martinez@cimav.edu.mx](mailto:diego.martinez@cimav.edu.mx)

**MEJÍA LECHUGA, PALOMA**

Fundación Cántaro Azul, A.C., San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.  
[paloma@cantaroazul.org](mailto:paloma@cantaroazul.org)

**MENA AGUILAR, GIBRÁN**

SocialTIC, A.C., CDMX, México.  
[gibran.mena@socialtic.org](mailto:gibran.mena@socialtic.org)

**MINK, TIRIAN**

Neta Cero, CDMX, México.  
[tirian@netacero.com](mailto:tirian@netacero.com)

**MORALES ARREDONDO, JOSÉ IVÁN**

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.  
[ivanma@geofisica.unam.mx](mailto:ivanma@geofisica.unam.mx)

**MURILLO JIMÉNEZ, JANETTE MAGALLI**

Geología Ambiental, Departamento de Oceanología, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México.  
[jmurillo@ipn.mx](mailto:jmurillo@ipn.mx)

**OLMOS MÁRQUEZ, MARIO ALBERTO**

Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.  
*marioolmos1970@gmail.com*

**ORTÍZ PÉREZ, MARÍA DEOGRACIAS**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México.  
*mdortizp@gmail.com*

**PÉREZ CASTREJÓN, SARA**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.  
*sara\_perez@tlaloc.imta.mx*

**POBLETE NAREDO, IRAIS**

Departamento de Toxicología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), CDMX, México  
*ipoblete@cinvestav.mx*

**PIÑA SOBERANIS, MARTÍN**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.  
*mpina@tlaloc.imta.mx*

**REYGADAS ROBLES GIL, FERMÍN**

Cántaro Azul, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.  
*fermin@cantarozul.org*

**REYNOSO CUEVAS, LILIANA**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados A.C, Unidad Durango, Durango, México.  
*liliana.reynoso@cimav.edu.mx*

**RIVERA HUERTA, MARÍA DE LOURDES**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.  
*lrivera@tlaloc.imta.mx*

**RUIZ SMITH, GERARDO**

Consultor independiente en planificación agroforestal y diseño hidrológico, San Miguel de Allende, Guanajuato, México.  
*gruizsmith@gmail.com*

**SALINAS-AGUIRRE JUAN E.**

Servicios de Salud de Coahuila de Zaragoza, Coahuila, México.  
*juan.salinas@me.com*

**SÁNCHEZ-RAMÍREZ, BLANCA**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.  
*bsanche@uach.mx*

**TERRELL, DYLAN**

Caminos de Agua, San Miguel Allende, Guanajuato, México.  
*dylan@caminosdeagua.org*

**VALLES ARAGÓN, MARÍA CECILIA**

Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.  
*valles.cecilia@gmail.com*

**VELASCO ESTUDILLO, MÓNICA NAYELI**

Posgrado Integral en Ciencias Administrativas, CONACYT-UAM Azcapotzalco, CDMX, México.  
*mvelasco\_lae@yahoo.com.mx*

**VERA TENORIO, NABANI**

Isla Urbana, A.C., CDMX, México.  
*nabani@islaurbana.org*

**VILLEGAS MENDOZA, IVÁN EMMANUEL**

Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.  
*ivan\_villegas@tlaloc.imta.mx*

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## PANORAMA DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO EN MÉXICO

María Deogracias Ortiz Pérez

La calidad del agua para consumo humano es una cuestión que preocupa en países de todo el mundo por su repercusión en la salud de la población<sup>1</sup>. Frecuentemente se considera la contaminación del agua superficial por la industria, agentes patógenos, cambio climático, etc, sin considerar que la contaminación natural del agua subterránea, debida en particular a los ambientes geológicos puede ser un factor muy importante, que limite la disposición de las fuentes de agua para el consumo humano, más aun si se toma en cuenta que es la mayor fuente de abastecimiento de agua potable en áreas áridas y semiáridas en México. Por otro lado, existe la percepción de que si son contaminantes naturales, no hay problema, y esto es ¡completamente erróneo!, los efectos en la salud por contaminantes, sean de origen antropogénico o natural, deben ser considerados. Por ello, la gran preocupación a nivel mundial, dado que el agua puede ser el vehículo silencioso, contribuyente al deterioro de la salud de las poblaciones expuestas.

En el caso particular de México, en el abastecimiento público, la fuente predominante es la subterránea con el 58.7% del volumen<sup>2</sup>, correspondiendo el 7.3% del agua subterránea que se destina al uso público doméstico<sup>2</sup>, además el 77 % del agua subterránea se destina a la agricultura.

Los depósitos de agua subterránea se localizan saturando espacios abiertos entre partículas de roca y oquedades de los materiales geológicos del subsuelo (acuíferos). Etimológicamente la palabra acuífero deriva de dos palabras latinas: aqua o agua y ferre, llevar. El origen del agua subterránea está en la precipitación atmosférica, cuando la lluvia cae, una parte es utilizada por las plantas y el suelo, otra parte escurre hacia los cauces, otra se evapora y el resto se infiltra recargando el agua subterránea<sup>3</sup>. El agua de los acuíferos se encuentra contenida dentro de los espacios porosos, fracturas y fisuras interconectadas entre las partículas de unidades geológicas permeables. Así, el agua permanece en contacto con las rocas que forman el acuífero y dependiendo de los componentes de las mismas, podrá disolver ciertos minerales y de esta manera dar origen a una contaminación natural.

Por ejemplo, en la cuenca de San Luis Potosí, la firma geoquímica de los sedimentos de relleno de fosa tectónica y la del agua subterránea, está controlada por las rocas volcánicas especialmente con su matriz vítrea, que se encuentra enriquecida en elementos incompatibles durante la diferenciación magmática, su disolución constituye el principal mecanismo de liberación de arsénico y uranio al agua subterránea<sup>4</sup>. Minerales como apatito y topacio aportan fluoruro al agua subterránea, las características geoquímicas del primero indican que contribuye en mayor proporción que el segundo<sup>5</sup>. Así, la posibilidad de que estos elementos se encuentren juntos en diversos estratos geológicos de las aguas subterráneas depende del tipo de rocas que conformen el acuífero, la naturaleza del suelo en cada lugar, las características hidrogeológicas, además del pH, salinidad, y temperatura del agua entre otras.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)<sup>2</sup> indica la importancia del papel de las aguas subterráneas en el crecimiento socioeconómico del país, por sus características físicas para ser aprovechadas de manera versátil, como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie

del acuífero. Lo preocupante es que se les considera “filtros purificadores, preservando la calidad del agua”<sup>2</sup>, y como se dijo anteriormente, la calidad del agua subterránea depende de las características geológicas del subsuelo.

El fluoruro y el arsénico están reconocidos como los principales contaminantes inorgánicos que se encuentran presentes en el agua de bebida y han ocasionado daño a la salud a nivel mundial<sup>6</sup>. La exposición al arsénico principalmente por el agua de consumo, es un problema grave de salud pública. Esta situación ha sido descrita en algunas partes de Argentina, Bangladesh, Chile, China, Hungría, India, México, Rumania, Taiwan, Vietnam y el suroeste de Estados Unidos<sup>7</sup>; en estas regiones se sobrepasa varias veces el límite máximo permisible para agua de consumo humano que en nuestro país es de 0.025 mg/L<sup>8</sup>.

Referente al fluoruro, se han reportado concentraciones altas en el agua subterránea de países del norte y sur de América, India, China, Sri Lanka, España, Holanda, Italia y México<sup>9</sup>. El límite máximo permisible en nuestro país es de 1.5 mg/L en agua para uso y consumo humano<sup>8</sup>.

Aunque los valores permisibles en México son 1.5 mg /L para el fluoruro y de 0.025 mg/L referente al arsénico, organizaciones internacionales han establecido límites menores debido a la publicación de los efectos a estos niveles, resultando en 0.7 mg/L y 0.01 mg/L, respectivamente.

En acuerdo a los resultados reportados por varias universidades del país y de la CONAGUA, en al menos 178 municipios ubicados en 23 estados del país existen localidades cuyas fuentes de agua presentan concentraciones de fluoruro y/o arsénico superiores a las consideradas en la normativa nacional para agua de uso y consumo humano. Estas localidades son consideradas de atención prioritaria y se encuentran principalmente en Chihuahua, Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Jalisco, Sonora, Coahuila, Baja California Sur e Hidalgo. Los intervalos de concentración reportados son de 0.05 a 29.6 mg de fluoruro por litro de agua y de 0.003 a 0.53 mg de arsénico por litro de agua.

## Derecho Humano al Agua

De acuerdo con la reforma al artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada el 8 de febrero de 2012, toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. También establece la participación de los tres órdenes de gobierno (federal, estatal y municipal) y la sociedad misma para garantizar este derecho<sup>9</sup>.

Dentro de las líneas de acción de los instrumentos rectores de planeación nacionales como son el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018<sup>10</sup> y el Programa Nacional Hídrico 2014-2018<sup>11</sup>, se reconoce que: “Asegurar agua suficiente y de calidad adecuada para garantizar el consumo humano y la seguridad alimentaria<sup>10</sup>, es uno de los pilares del desarrollo nacional, una condición necesaria para mantener el bienestar y salud de nuestra población y uno de los elementos indispensables para un medio ambiente sano”<sup>11</sup>.

A pesar de los problemas de contaminación del agua que se han reportado a nivel nacional, la CONAGUA en el año de 2012 informó el 92% de cobertura nacional de “agua potable” y el 97.9% desinfectada por cloración<sup>11</sup>. Estos porcentajes provienen, del censo INEGI<sup>12</sup> que en la unidad: I. Características de la vivienda, sección 5. Disponibilidad de Agua, se pregunta a la población “¿Cuenta con agua entubada dentro de la vivienda o en el terreno?”. De esta manera con la información proporcionada por un ciudadano, CONAGUA acredita el agua entubada como agua potable, la pregunta sigue siendo ¿Qué análisis se le ha hecho al agua para conferirle esta definición?

El concepto de agua potable se refiere al agua que no implica un riesgo para el consumo humano. Es decir, está libre de microorganismos, de contaminantes químicos y radiológicos (metales metaloides, compuestos orgánicos etc.) y que es sensorialmente aceptable (inodora, incolora y sinsabor). Cuando la presencia de compuestos químicos disueltos exceden ciertas concentraciones que son tóxicas para la salud humana, se considera, que el agua está contaminada, y por lo tanto hay que removerlos, para poder destinar sin riesgo dicha agua al consumo humano. Tal es el caso de la presencia de contaminantes como el fluoruro y el arsénico.

En México y a nivel global, por falta de información, el concepto de “agua potable” está mal percibido y aplicado, ya que cuando se obtiene agua después de la perforación de un pozo, no se realizan los análisis necesarios para verificar que la calidad del agua pueda ser considerada apta para el consumo humano y en el caso de hacerlos y no cumplirse con el requisito de calidad, estos resultados no son difundidos para evitar el consumo de agua contaminada. Desde 1991 la CONAGUA estableció el Programa “Agua Limpia”, a partir del cual la cloran para eliminar la cantidad de bacterias presentes y es por ello que infieren que es potable, dado que está libre de microorganismos activos; sin embargo, solo se tiene un agua desinfectada, sin tomar en cuenta que la contaminación la generan también compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos en el agua, y que dichos contaminantes, como en el caso del fluoruro y arsénico, no se eliminan por la cloración o por hervir el agua, por el contrario desafortunadamente incrementan su concentración, haciéndola más tóxica y menos apta para el consumo humano.

La falta de acciones frente a la problemática de la calidad del agua subterránea cuando no es apta para consumo humano ha conducido a que cerca de 6.5 millones de niños<sup>13</sup> en nuestro país estén expuestos a concentraciones de fluoruro y/o arsénico que están ocasionando daños a la salud. Se ha estimado que a nivel nacional existen al menos 1.5 millones de personas que ingieren agua con concentración mayor a 0.025 mgAs/L y de éstos, aproximadamente 150,000 se encuentran en mucho mayor riesgo por ingerir las concentraciones más altas de arsénico en agua (0.075-0.530 mgAs/L; INCA, 2018)<sup>14</sup>. Para el caso de fluoruro, se ha estimado<sup>14</sup> que en México existen alrededor de veinte millones de personas que ingieren agua con concentraciones mayores a 1.5 mgF/L, de los cuales aproximadamente 900,000 - ubicadas en localidades de San Luis Potosí, Durango, Zacatecas, Jalisco, Chihuahua y Sonora - se encuentran en mayor riesgo por ingerir las concentraciones más altas de fluoruro en agua (4.5-29.6 mg/L; INCA, 2018)<sup>14</sup>. Es importante puntualizar que en alrededor del 47 % de las localidades evaluadas con concentraciones fuera de la normatividad, se presenta la exposición concomitante a ambos contaminantes<sup>13,14</sup> y es posible que existan efectos antagónicos o sinérgicos de esta coexposición.

Frente a esta situación es indispensable evaluar la calidad del agua antes de distribuirla a la población como “agua potable”, realizando análisis de la fuente o su tratamiento para conocer su calidad y en caso de la presencia de contaminantes, habrá que llevar a cabo las gestiones correspondientes, para en caso de que no se tenga otra fuente alterna de agua, se implemente un sistema de tratamiento, que remueva dichos contaminantes hasta los niveles aceptables de consumo humano. Dicha responsabilidad de analizar y tratar en su caso el agua para que cumpla con la calidad requerida para consumo humano, en México corresponde a los organismos administradores del agua (Juntas de agua, organismos operadores, etc.) y los encargados de vigilar que esto se cumpla por normatividad corresponde a la Secretaría de Salud a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y sus delegaciones Estatales. A los habitantes de una comunidad, nos concierne el informarnos de la calidad del agua que consumimos y exigir a las autoridades correspondientes nuestro derecho a tener un agua potable y segura.

Las autoridades encargadas del suministro de agua, deberán difundir los resultados sobre la calidad del agua y prevenir a la población de los efectos de consumirla directamente o utilizar esta agua en la cocción de los alimentos. Tanto la autoridad como la población deben estar prevenidas

y en su caso hacer los cambios de vida necesarios para preservar la salud. Recordemos que la mejor solución es la prevención, más que tratar de remediar los efectos, que en muchos casos son permanentes.

## Referencias

- <sup>1</sup> WHO. Guidelines for drinking-water quality, third edition, incorporating first and second addenda.
- <sup>2</sup> EAM 2017. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html) EAM2017, [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html)
- <sup>3</sup> Fetter, C W. Applied Hydrogeology (3rd ed., pt. 1, pp. 1-21). New Jersey: Prentice Hall. (1942).
- <sup>4</sup> Banning A, Cardona A, Rúde TA. Uranium and arsenic dynamics in volcano-sedimentary basins. An exemplary study in North-Central Mexico. *Appl Geochem* 27,2160–2172 (2012).
- <sup>5</sup> Cardona A, Banning A, Carrillo-Rivera CC, Aguillón-Robles A, Rúde TR, Aceves de Alba J. Natural controls validation for handling elevated Fluoride concentrations in extraction activated Tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environ Earth Sci* 77, 121(2018).
- <sup>6</sup> WHO. International Programme on Chemical Safety. [http://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/chemicals\\_phc/en/](http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/)
- <sup>7</sup> Smedley P, Kinniburgh D. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *App Geochem* 17, 517-568 (2002).
- <sup>8</sup> 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”. Diario Oficial de la Federación. 22 de noviembre del 2000.
- <sup>9</sup> Singh R, Singh Y, Swaroop D. Defluoridation of Grounwater in Agra City Using Low Cost Adsorbents, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 65, 120-125 (2000).
- <sup>10</sup> Plan Nacional de Desarrollo del Gobierno de México. <http://pnd.gob.mx/>
- <sup>11</sup> CONAGUA. Programa Nacional Hidrico <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-hidrico-pnh-2014-2018>.
- <sup>12</sup> INEGI. Cuestionario basico del Censo de Población y Vivienda. [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/doc/cpv2010\\_cuest\\_basico\\_d.pdf](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/doc/cpv2010_cuest_basico_d.pdf).
- <sup>13</sup> Limón-Pacheco JH, Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Sánchez-Retana IM, Gonsebatt ME, Del Razo LM. Potential co-exposure to arsenic and fluoride and biomonitoring equivalents for Mexican children. *Ann Glob Health* 84, 257-273 (2018).
- <sup>14</sup> Inventario Nacional de Calidad de Agua, INCA (2018) <https://www.calidaddelagua.org>.

## SITUACIÓN DE LA PRESENCIA DE ARSÉNICO Y FLUORURO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO

María Aurora Armienta, Antonio Cardona, Israel Labastida, María Catalina Alfaro de la Torre y María de Lourdes Ballinas Casarrubias

La presencia de arsénico y fluoruro en el agua subterránea en concentraciones superiores a la norma nacional y a las guías internacionales para agua potable ha sido reportada en varios estados del país. Por otro lado, en otros, no se han detectado altas concentraciones, o bien la difusión de su identificación ha sido limitada o se requieren mayores estudios prospectivos. Aquí se presenta un resumen de publicaciones en las cuales se reporta la presencia de uno o ambos elementos y sus posibles orígenes en el agua subterránea.

### Norte de México

En el Norte de México, la problemática de salud relacionada con la exposición a arsénico y fluoruro ha sido resaltada en varios estudios y es de alta importancia para la región por ser el agua subterránea la principal fuente para uso y consumo humano. Los estudios indican que con frecuencia arsénico y fluoruro se presentan juntos en agua subterránea extraída en cuencas cerradas<sup>1</sup> y de estos trabajos se desprende que los Estados del Norte de México con mayores problemas en cuanto a estos elementos en el agua son Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Baja California y Sonora. Enseguida se hace una breve descripción de la problemática en los Estados mencionados. En este documento, la concentración de arsénico se refiere a la total disuelta.

**Península de Baja California.** Las concentraciones detectadas de arsénico en agua subterránea y superficial en las zonas rurales de todo el Estado de Baja California Sur (BCS) varían entre valores inferiores a lo que marca la modificación a la NOM-127- 2000 (0.025 mg/L) hasta 0.5 mg/L. Cassassuce y colaboradores (2005) (citado en Wurl y colaboradores<sup>2</sup>) reportaron que de 440 muestras colectadas, el 16% contenía arsénico en concentraciones mayores a 0.025 mg/L de las cuales el 4% contenía aún valores mayores de 0.1 mg/L encontrando un máximo de 0.45 mg/L en el Distrito San Antonio-El Triunfo, una comunidad afectada por residuos mineros históricos que parecen ser el origen del contaminante. En los sitios estudiados en el Distrito San Antonio – El Triunfo, las aguas termales contenían fluoruro en concentraciones entre 0.095 y 3.2 mg/L en contraste con concentraciones de arsénico menores a 0.01 mg/L<sup>2</sup>. En el agua subterránea de Ensenada en el Norte de la Península, se determinaron concentraciones de fluoruro entre 0.45 y 2.5 mg/L de un total de 26 pozos muestreados<sup>3</sup> de los cuales un tercio tenía concentraciones mayores a 1 mg/L; los autores asociaron la presencia de fluoruro a interacciones agua-roca y composiciones NaCa y NaCl no encontrando asociación con sistemas termales. En Bahía Concepción, BCS, se determinaron concentraciones de 0.15 a 0.78 mgAs/L en fluidos hidrotermales y en un acuífero poco profundo en Mexicali posiblemente influenciado por la riqueza de este elemento en varios sistemas geológicos en la Península<sup>4</sup>. Armienta y colaboradores<sup>5</sup> colectaron 87 muestras de aguas de pozo en el acuífero somero (50-100 m) y profundo (1200-3200 m) en la zona agrícola, en pozos geotérmicos, canales de riego y otros cercanos al Complejo Geotérmico de Cerro Prieto en Mexicali, Baja California. Las concentraciones más altas se asociaron a pozos y lagunas de evaporación en el campo geotérmico (0.3 a 5.2 mg de arsénico /L; 1.2-4.6 mg para fluoruro /L) y las más bajas en la zona agrícola (trazas-0.018 mg/L para arsénico; 0.2-0.6 mg/L para fluoruro) poniendo en evidencia que en la región existe un riesgo bajo de influencia de la zona geotérmica sobre el acuífero utilizado para la agricultura.

**Sonora.** En estudios más recientes<sup>6</sup> se reportaron concentraciones de fluoruro entre 0.5 y 7.6 mg/L en el agua potable de Hermosillo proveniente de pozos. La concentración de fluoruro se asoció a flujos regionales profundos en donde el fluoruro podría tener su origen en rocas de tipo granítico aunado al largo tiempo de residencia del agua y a procesos de hidrotermalismo. Las concentraciones más elevadas se encontraron en “La Victoria”, en el valle del Río San Miguel; las menores concentraciones correspondieron a aguas con alto contenido de calcio y bicarbonato. Con respecto a la presencia de arsénico, se analizaron 173 muestras de aguas de pozo y tanques de almacenamiento de las principales ciudades de Sonora como Hermosillo, Obregón, Guaymas, Navojoa y otras, cuyos resultados se publicaron en 1998<sup>7</sup>, encontrando concentraciones entre 0.002 y 0.305 mg/L; los autores sugieren una correlación positiva ( $r= 0.53$ ;  $P=0.01$ ,  $n=116$ ) entre las concentraciones de arsénico y el fluoruro en el agua muestreada en su zona de estudio. Las más altas concentraciones de ambos elementos se encontraron en la parte Norte de la ciudad de Hermosillo. Un dato relevante es que en el periodo del estudio el 50% de la población en la Ciudad de Hermosillo recibía agua de pozo clorada. En un esfuerzo binacional entre Arizona, EUA y México para estimar la concentraciones de arsénico consumidas a través del agua, Roberge y colaboradores<sup>8</sup> analizaron 73 muestras de agua de pozo en el Valle del Yaqui y 41 pozos en Hermosillo a los cuales la población tiene acceso y determinaron concentraciones de arsénico de  $0.025\pm 0.008$  mg/L, las más altas en Hermosillo, mientras que en el Valle del Yaqui las concentraciones fueron  $<0.015$  mg/L; en estudios previos<sup>9</sup> se reportaron concentraciones de arsénico de 0.043 mg/L en la comunidad Esperanza y 0.005 mg/L en la colonia Allende, en el Valle del Yaqui.

**Durango y Coahuila, la Comarca Lagunera.** La mayoría de los estudios correspondientes a estos Estados se suscriben a una región común que es la Comarca Lagunera. Un estudio reciente de la región<sup>10</sup> analizó muestras de agua subterránea y de suelos en 59 sitios abarcando los municipios de Gómez Palacios, Torreón, Matamoros, Tlahualilo, Lerdo, San Pedro y Viesca. Determinaron que el 91.4% de las muestras sobrepasaban concentraciones de 0.01 mg/L para As alcanzando valores hasta de 0.33 mg/L aunque en dos sitios (3.4% de las muestras; municipio de Matamoros) las concentraciones fueron preocupantemente altas (0.49 y 0.65 mg/L). Por otra parte, las concentraciones de fluoruro fueron del orden de 0.25 a 1.8 mg/L correspondiendo a las ya reportadas en otros estudios<sup>11,12</sup>; las más altas concentraciones se determinaron en sitios de los municipios de Matamoros y San Pedro. La presencia de arsénico en las aguas subterráneas se asoció posiblemente a su liberación de óxido-hidróxidos de hierro mientras que el fluoruro a la disolución de minerales ricos en fluorita y a cambios temporales de pH que pueden alterar los ciclos geoquímicos de arsénico y fluoruro en las aguas subterráneas. Sariñana y colaboradores<sup>10</sup> no encontraron una correlación entre las concentraciones de arsénico o fluoruro del suelo con las concentraciones en el agua subterránea sugiriendo más bien que la contaminación del suelo podría estar relacionada en parte con el uso de agua contaminada en el riego. En agua de grifo, en la colonia 5 de Febrero, en Durango, Dgo., Rocha y colaboradores<sup>13</sup> reportaron concentraciones de arsénico del orden de 0.001-0.245 mg/L, y de fluoruro de 1.35 - 11.1 mg/L, éstos últimos se encuentran entre los valores más altos medidos en agua subterránea, evidenciando que los habitantes de este lugar están expuestos a ambos contaminantes simultáneamente.

**Zacatecas.** La presencia de arsénico y fluoruro parece estar relacionada con la matriz de acuíferos de tipo granular y fluvial; y hacia el sur del estado ha habido reportes de actividad geotérmica. El estudio más reciente es de Martínez y colaboradores<sup>14</sup> quienes analizaron 47 muestras de agua de grifo de la parte sureste del estado (Guadalupe, Jerez, Ojocaliente, Villanueva, Jalpa, Tabasco, Huanusco y El Visitador con una población total expuesta de 331,687 personas). Encontraron que el 90% de las muestras sobrepasaba la concentración de 0.01 mg/L para arsénico y 43% para fluoruro; el riesgo estimado correspondió a que el 80% de los habitantes podrían estar expuestos a arsénico y 22% a niveles de fluoruro superiores a los recomendados por la Normativa para agua de uso y consumo humano. Solo las muestras colectadas en Villanueva tenían concentraciones dentro de lo

que marca la Normativa Nacional (0.004 a 0.007 mg/L para arsénico y 0.3-0.6 mg/L para fluoruro); mientras que en Ojocaliente se encontraron las concentraciones más altas para arsénico (0.125-0.298 mg/L); finalmente, las concentraciones más altas para fluoruro, en Tabasco (0.8-3.0 mg/L), El Visitador (0.8-2.4 mg/L) y Jerez (1.6-2.3 mg/L).

**Chihuahua.** El estado de Chihuahua abarca gran parte del desierto localizado en la zona norte de la República Mexicana. De los 61 acuíferos que existen en el estado, 17 presentan condiciones de sobreexplotación. Entre éstos se encuentra el acuífero Meoqui-Delicias, el cual cuenta con cerca de 1000 aprovechamientos que en su mayoría se destinan al riego agrícola, aunque una parte del volumen extraído se emplea para el suministro de agua potable a los habitantes de la región<sup>15</sup>.

En esta región del país, se pueden identificar cuatro factores naturales responsables de la contaminación por arsénico en el agua subterránea: la formación de la sierra Madre Occidental, SMO, el hidrotermalismo, el enriquecimiento supergénico de los minerales y la distribución de los yacimientos a lo largo de las cuencas endorreicas del centro del país<sup>16</sup>.

Dentro de la contribución antropogénica, cabe destacar la actividad minera desarrollada en esta zona históricamente. El origen de la presencia del arsénico en aguas subterráneas no está bien comprendido, pero se ha sugerido a la disolución o desorción de los minerales que constituyen el acuífero (especialmente óxidos metálicos) bajo condiciones oxidantes como el principal mecanismo responsable, en combinación con las bajas velocidades del flujo subterráneo, aunado a la evaporación<sup>11</sup>. Factores tales como el potencial redox y pH afectan la movilidad de arsénico en el ambiente sub-superficial.

En el trabajo de Camacho (2011)<sup>17</sup> se compilan los estudios de ocurrencia de arsénico, efectuados durante la década de los 90. Las concentraciones de arsénico reportadas para los acuíferos de Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo, datan desde 1996. En un estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua (CNA) se reportaron 50% de los pozos con concentraciones por arriba de 0.050 mg/L desde el 2000. Las concentraciones más altas se encontraron en las ciudades de Aldama, Julimes y cerca de Delicias donde, algunos pozos presentan concentración por arriba de 0.450 mg/L.

En el 2009, Espino-Valdés reportó las concentraciones de arsénico superiores a los 0.025 mg/L en 72% de los 61 pozos muestreados también en el acuífero de Meoqui-Delicias. Su presencia se atribuye a las fuentes geogénicas relacionadas a flujos de recarga que provienen de depósitos de minerales de arsenopirita de los sistemas rocosos aledaños, así como al contacto con los sedimentos del acuífero. En 2015, González-Horta y colaboradores<sup>18</sup> evaluaron 1119 muestras provenientes de tomas domiciliarias de 13 municipios: Aldama, Camargo, Chihuahua, Coronado, Delicias, Jiménez, Julimes, la Cruz, Meoqui, Rosales, San Francisco de Conchos, Saucillo y Satevó, donde se encontró de 0.001 a 0.419 mg de arsénico /L y de 0.05 a 11.8 mg de fluoruro/L.

En cuanto a regiones al norte del Estado, se tienen reportes sobre una exploración hidrogeológica en el área de la Mesilla para estudiar la posibilidad de abastecer a Ciudad Juárez, de agua potable. Los resultados del análisis de arsénico a profundidad mostraron concentraciones en el agua subterránea extraída en el rango de 0.005-0.044 mg/L y en muestras obtenidas hasta 250 m en el rango de 0.005-0.650 mg/L.

Reyes Gómez y colaboradores<sup>19</sup> han estudiado la ocurrencia y origen del arsénico y el fluoruro en los acuíferos de Tabaloapa-Aldama-Laguna de Hormigas en el Estado. En todos los casos, los pozos contaminados con arsénico coinciden con la presencia de fluoruro; correlación que también aumenta a temperaturas elevadas. En este acuífero la temperatura es generalmente de 32°C, las elevadas temperaturas y la presencia de riolitas y lutitas ha promovido la ocurrencia simultánea de arsénico y fluoruro que se encuentran principalmente en los fragmentos de vidrio volcánico con presencia de fluorapatita y altos contenidos de arsénico. En otro reporte de Reyes Gómez<sup>1</sup>, se

compararon varios años de muestreo donde se ejemplifica como en el valle de Tabaloapa, cerca de Aldama, se observaron diferencias entre 0.09 y 0.022 mg/L en la concentración de arsénico por efecto de la profundidad, donde para el año 2007 se muestreó a 54 m, mientras que en el 2010 a 102 m. Se observó un aumento en los niveles en ese año, en seis de los nueve pozos muestreados para arsénico, mientras que para fluoruro en nueve de los diez.

**San Luis Potosí.** Con base en la información de un estudio a la escala del estado de San Luis Potosí (SLP), que tomó en cuenta 237 muestras de agua tomadas en aprovechamientos utilizados para uso y consumo humano y correspondientes a 157 localidades de más de 500 habitantes ubicadas en 33 municipios (sin considerar los que constituyen la zona metropolitana de SLP), se identificó que el 28.5% y el 11.1 % sobrepasan los límites permisibles establecidos en la modificación de la NOM-127 para fluoruro (en 13 municipios) y para arsénico (en 8 municipios). Los municipios de Charcas, Santo Domingo, Salinas de Hidalgo, Villa de Ramos, Villa de Guadalupe, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, ubicados en la zona altiplano Potosino, presentaron muestras de agua que rebasan las concentraciones de referencia tanto para fluoruro como para arsénico<sup>20</sup>. Para la zona metropolitana de SLP, se han identificado concentraciones de fluoruro entre 1.5-4.0 mg/L en el agua subterránea, en aproximadamente el 65% del volumen total ( $\approx 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) del agua extraída para diversos usos<sup>21</sup>; los valores de arsénico superiores al estándar nacional representan un porcentaje del orden de 10% de las muestras (107 muestras), dato que se eleva al 55% cuando se considera el estándar internacional de la Organización Mundial de la Salud de 0.01 mg/L<sup>22</sup>. Las fuentes geogénicas primarias para el fluoruro y el arsénico que se moviliza hacia el agua subterránea, han sido identificadas en las rocas volcánicas félsicas del Terciario, unidades que constituyen el medio fracturado por el que circulan sistemas de flujo regional que son captados por medio de pozos. De acuerdo con Cardona y colaboradores<sup>21</sup> la presencia de minerales ricos en fluoruro (topacio y apatito) en rocas volcánicas de la denominada Secuencia Volcánica Inferior<sup>23</sup>, condiciona que la concentración media de fluoruro sea del orden de 1,700 mg/Kg; en contraste, los valores de fluoruro correspondientes a la Secuencia Volcánica Superior (del orden de 800 mg/Kg) son similares al promedio global de rocas ígneas félsicas. La concentración media de arsénico en las rocas volcánicas es de 9.8 mg/Kg, los mayores valores (promedio 12.2 mg/Kg) se identificaron en las unidades de composición riolítica<sup>22</sup>. Una fuente geogénica secundaria para el arsénico ha sido identificada en los sedimentos de relleno de fosa tectónica, medio granular por el que circulan sistemas de flujo intermedio. La concentración mediana de arsénico en los sedimentos de relleno es 10.4 mg/Kg, la porción arenosa presenta una concentración ligeramente mayor (11.7 mg/Kg). El análisis del grado de alteración de las rocas volcánicas indicó que en la medida de que se incrementa la alteración de la roca disminuye la presencia de apatito, mientras que la presencia de topacio se mantiene, indicando que el primero se intemperiza durante la interacción agua/roca en condiciones de baja temperatura y constituye la principal fuente de fluoruro al agua subterránea<sup>21</sup>. En lo que se refiere al proceso de movilización del arsénico hacia el agua subterránea, la disolución del vidrio volcánico durante los procesos de intemperismo, estimulado por el incremento de la temperatura a profundidad asociado con los sistemas de flujo regional, constituye el principal mecanismo. Adicionalmente, para los sedimentos las reacciones identificadas incluyen decarbonatización de los sedimentos de playa y desorción de arsénico a partir de oxi-hidróxidos de hierro y manganeso que cubren a los sedimentos clásticos<sup>22</sup>. Con base en la información disponible, es posible señalar que el incremento en la extracción de agua subterránea en la zona metropolitana de SLP, ha producido el aumento de la superficie en la que se capta agua subterránea (por medio de pozos) con valores elevados de fluoruro (mayor de 2.0 mg/L), de 73 Km<sup>2</sup> para 1987 ( $\approx 2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a 135 Km<sup>2</sup> en 2007 ( $\approx 3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) condición que probablemente también aplique para el arsénico en el agua subterránea.

## Centro y Sur de México

En localidades de diversos estados de la zona central y del sur del país se han determinado también altos contenidos de arsénico y/o fluoruro en el agua subterránea que en muchos de ellas constituyen la fuente principal o única de agua potable de las poblaciones.

**Hidalgo.** En el municipio de Zimapán, Hidalgo se han evaluado concentraciones muy elevadas de arsénico en el agua subterránea destinada al abastecimiento municipal, hasta 1.3 mg/L en el pozo profundo El Muhi que se utilizaba directamente hasta 1993 y es actualmente conducida a un sistema de tratamiento. Zimapán es una zona semi-árida carente de cuerpos de agua superficial que pudieran utilizarse como fuentes alternas. Desde 1992 se realizaron estudios multidisciplinarios para determinar su origen y distribución en el sistema acuífero. Las investigaciones incluyeron análisis químicos e isotópicos del agua, caracterizaciones y modelaciones hidrogeoquímicas, evaluación de la hidrogeología, geología y mineralogía, así como determinaciones químicas, isotópicas y mineralógicas a detalle en suelos, rocas, y residuos mineros. La minería para la extracción de plata, plomo, zinc y cobre, ha sido desde la época de la colonia la principal actividad económica de la población. La mineralización que acompaña a los metales de interés económico incluye arsenopirita y otros minerales secundarios de arsénico<sup>24</sup>. Los estudios revelaron que la interacción del agua subterránea con dichos minerales, ha originado la presencia natural del contaminante en el acuífero calizo profundo que se utiliza para abastecer el agua municipal. Las diversas formaciones de Zimapán con evidencias de mineralización contienen altas concentraciones de arsénico (hasta 10,000 mg/Kg en una de las muestras de roca). Las fracturas y fallas por donde circula el agua en el acuífero calizo favorecen la presencia de minerales de arsénico y por lo tanto su liberación. Se encontró también que en la zona de rocas volcánicas al este del valle, los contenidos de arsénico en norias y pozos son menores. Por otro lado, el procesamiento de los minerales originó montañas de residuos acumulados a lo largo de varias décadas que permanecen a la intemperie a la orilla de la cabecera municipal. Los procesos de oxidación en los jales mineros han liberado arsénico hacia las norias cercanas, mientras que otras fueron contaminadas debido a la percolación por el suelo de los humos de fundidoras que operaron hasta la década de los 40's del siglo pasado. Diversas norias particulares contienen concentraciones menores de arsénico, inferiores o cercanas a la norma para agua potable debido a la interacción del agua del acuífero somero con el material granular del mismo<sup>25,26,27</sup>. Además, el pozo con mayor concentración de arsénico contiene también 2.5 mg/L de fluoruro, cuyo origen no ha sido determinado pero que posiblemente se deba a la interacción del agua con fluorita presente en el acuífero.

Se ha detectado también la presencia de arsénico (hasta 0.017 mg/L) en algunos pozos del valle de Tula debido probablemente al riego con aguas residuales. Además algunos pozos contienen fluoruro (hasta 2.46 mg/L) debido posiblemente a interacción con el medio geológico. En San Miguel Vindhó se encontró una alta prevalencia de fluorosis en la población expuesta a 1.41 mg/L de fluoruro de un pozo<sup>28</sup>.

**Puebla.** En este estado se han medido concentraciones elevadas de arsénico (hasta 73.6 mg/L) en pozos geotérmicos de Los Humeros sin que se hayan reportado minerales con arsénico en la matriz rocosa. Para evitar el impacto ambiental de los fluidos geotérmicos en la superficie, se ha recomendado mantener un ciclo cerrado de producción entre los pozos de extracción, la generación de energía y la reinyección de los fluidos<sup>29</sup>.

**Guanajuato.** En la Cuenca de la Independencia, en el estado de Guanajuato se midieron concentraciones elevadas de arsénico y fluoruro en aguas subterráneas. Investigaciones realizadas que han incluido análisis químicos e isotópicos del agua, análisis químicos y mineralógicos de rocas, modelación hidrogeoquímica y análisis estadístico multivariado, cuyos resultados fueron interpretados en el contexto hidrogeológico, han indicado que el intemperismo de las riolitas y

la oxidación de minerales con arsénico influidos por un largo tiempo de residencia originaron la contaminación por fluoruro (hasta 16 mg/L) y arsénico (hasta 0.12 mg/L) en el agua subterránea<sup>30,31</sup>.

En el área de Juventino Rosas, en el mismo estado también se presenta arsénico (hasta 0.046 mg/L) y elevados contenidos de fluoruro (hasta 3.03 mg/L reportados y un pozo medido recientemente con 7.0 mg/L) en el agua subterránea de abastecimiento. Con base en un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico se ha propuesto a la interacción del agua con las riolitas como la fuente más probable de su presencia<sup>32</sup>.

En Salamanca se han medido concentraciones superiores a la norma para arsénico (hasta 0.072 mg/L) y fluoruro (hasta 6.5 mg/L). La presencia de arsénico se ha atribuido al depósito de partículas transportadas por el aire en zonas de alta vulnerabilidad acuífera así como a la oxidación de minerales que lo contienen y transportan por las fallas<sup>33</sup>.

**Jalisco.** En el sistema acuífero de Guadalajara, se propuso un modelo conceptual hidrogeológico que fue acompañado de interpretaciones hidrogeoquímicas y estadísticas de análisis químicos del agua para identificar la fuente de fluoruro (hasta 4.0 mg/L) que se atribuyó a disolución de fluorita e intercambio iónico en silicatos<sup>34</sup>.

En la zona de Los Altos de Jalisco se analizó el agua de 129 pozos y se encontró que 44 de ellos excedían 0.025 mg/L de arsénico, y 23 presentaban temperaturas arriba de los 30°C. Se determinaron también concentraciones altas de fluoruro (hasta 17.7 mg/L) en pozos termales. La estimación de las dosis de exposición a cada uno de estos elementos indicó que su presencia constituye un riesgo a la salud para la población<sup>35,36</sup>.

**Querétaro.** En el poblado de La Llave, cerca de la ciudad de San Juan del Río, Querétaro, se han detectado altas concentraciones de fluoruro en el agua de consumo, con valores hasta de 1.99 ± 0.7 mg/L, lo que ha ocasionado que algunos escolares entre 10 y 13 años presenten fluorosis. El problema lo atribuyen no sólo al agua, sino también al consumo de sal fluorurada, jugos y bebidas carbonatadas que contienen fluoruro<sup>37</sup>. No se menciona el posible origen del fluoruro en el agua de consumo; sin embargo, es probable que sea natural.

**Tlaxcala.** En este estado se determinaron las concentraciones de arsénico en el sistema hidrológico Zahuapan Atoyac, formado por el río Zahuapan en su totalidad y el trayecto del río Atoyac que se interna en el estado de Tlaxcala. Las concentraciones en el agua oscilaron entre 0.06 y 0.87 mg/L y de 1.3 a 127 mg/Kg en sedimento. De hecho el agua de este sistema hidrológico es utilizada como fuente de abastecimiento de agua potable además de que es utilizada en la zona sur del estado para el riego de hortalizas. La presencia del arsénico es asociada a un posible aporte natural no especificado y a un aporte antropogénico constituido por la descarga de aguas residuales de origen urbano y agroquímicos que se mezcla con el agua de los manantiales<sup>38</sup>.

**Colima.** Entre las ciudades de Colima y Villa de Álvarez se detectó un pozo con una concentración de 0.082 mg/L de arsénico. Hasta el momento no se ha identificado la principal fuente del mismo; sin embargo, debido al diferencial de concentraciones entre lo reportado en el estado y lo reportado en esta zona, se le da una mayor atribución a una posible causa antropogénica. Por lo que se requieren mayores estudios en cuanto al origen de la contaminación particularmente en estos pozos<sup>39</sup>.

**Guerrero.** En Guerrero, en la zona de Taxco se encontraron concentraciones de arsénico entre 0.014 y 0.022 mg/L en el río Taxco; sin embargo, la aportación del arsénico proviene de residuos mineros que se encuentran a un costado del río, por lo que el agua puede contener otros metales además del arsénico. Se menciona el papel que juega la formación de otros minerales como los oxihidróxidos de hierro en la retención del arsénico, impidiendo que la concentración en el río se incremente<sup>40</sup>.

**Oaxaca.** En Oaxaca también se ha demostrado la presencia de arsénico, en el municipio de Tlacolula se encontraron pozos con concentraciones de 0.1 mg/L. Este caso es particularmente importante porque se menciona que, en el paraje conocido como Flor de Guayabal, el agua es utilizada para agricultura y consumo humano sin un tratamiento previo. Los cultivos que son regados con este tipo de agua son: jitomate, lechuga, zanahoria, maíz, frijol, entre otros. Los productos cosechados son empleados para autoconsumo, venta o intercambio en los mercados de Tlacolula, Mitla y la ciudad de Oaxaca. El rango de concentraciones encontrado fue de 0.043 a 0.192 mg de arsénico/L. Se determinó que a mayor profundidad mayor concentración de arsénico, no se menciona el origen, pero es probable que sea natural. Afortunadamente no se detectó acumulación de arsénico en las hortalizas, por lo que su consumo no representa un riesgo en comparación con el consumo de agua<sup>41</sup>.

En otro estudio realizado en acuíferos de los valles centrales de Oaxaca, se encontró arsénico en concentraciones máximas de 0.17 mg/L, los valores más elevados se midieron en las inmediaciones de Tlacolula y Yagul. No existe evidencia de un origen antrópogénico, en este caso se sugiere un origen natural por la presencia de riolitas<sup>42</sup>.

La concentración de arsénico encontrada en ocho de nueve pozos de aguas de consumo humano de Salina Cruz, Oaxaca osciló de 0.012 a 0.018 mg/L, valores inferiores al límite permisible de 0.025 mg/L en México. Sin embargo, excede el valor guía de 0.010 mg/L de la OMS. En este caso el problema es atribuido a la contaminación ocasionada en el acuífero por las aguas negras ya que se encontró presencia de coliformes<sup>43</sup>.

En otros lugares como Tequisquiapan (Querétaro), Tabasco y Cuilapam de Guerrero y San Martín Mexicapam (Oaxaca) se han encontrado casos de fluorosis, sin embargo el problema es atribuido al consumo de sal fluorurada; por otro lado, se menciona que es importante mantener un monitoreo sobre la calidad del agua de consumo para determinar otros factores de riesgo.

## Referencias

- <sup>1</sup> Reyes-Gómez VM, Alarcón-Herrera MT, Gutiérrez M, Núñez-López D. Arsenic and fluoride variations in groundwater of an endorheic basin undergoing land-use changes. *Arch Environ Contam Toxicol*, 68, 292–304 (2015).
- <sup>2</sup> Wurl J, Mendez-Rodríguez L, Acosta-Vargas B. Arsenic content in groundwater from the southern part of the San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, Mexico. *J Hydrology*, 518, 447–459 (2014).
- <sup>3</sup> Daesslé LW, Ruiz-Montoya L, Tobschall HJ, Chandrajith R, Camacho-Ibar VF, Mendoza-Espinosa LG, Quintanilla-Montoya AL, Lugo-Ibarra KC. Fluoride, nitrate and water hardness in groundwater supplied Mexico. *Environ Geol*, 58, 419–429 (2009).
- <sup>4</sup> Villanueva-Estrada RE, Prol-Ledesma RM, Rodríguez-Díaz AA, Canet C, Armienta MA. Arsenic in hot springs of Bahía Concepción, Baja California Península, México. *Chemical Geology*, 348, 27–36 (2013).
- <sup>5</sup> Armienta MA, Rodríguez R, Ceniceros N, Cruz O, Aguayo A, Morales P, Cienfuegos E. Groundwater quality and geothermal energy. The case of Cerro Prieto Geothermal Field, México. *Renewable Energy*, 63, 236-254 (2014).
- <sup>6</sup> Valenzuela-Vázquez L, Ramírez-Hernández J, Reyes-López J, Sol-Urbe A, Lázaro-Mancilla O. The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo City, Sonora, Mexico. *Environ Geol*, 51, 17–27 (2006).
- <sup>7</sup> Wyatt CJ, Fimbres C, Romo L, Méndez RO, Grijalva M. Incidence of heavy metal contamination in water supplies in Northern Mexico. *Environmental Research, Section A*, 76, 114-119 (1998).
- <sup>8</sup> Roberge J, O'Rourke MK, Meza-Montenegro MM, Gutierrez-Millán LE, Burgess JL, Harris RB. Binational arsenic exposure survey: methodology and estimated arsenic intake from drinking water and urinary arsenic concentrations. *Int J Environ Res Public Health*, 9, 1051-1067 (2012).
- <sup>9</sup> Andrew AS, Burgess JL, Meza MM, Demidenko E, Waugh MG, Hamilton JW, Karagas MR. Arsenic exposure is associated with decreased DNA repair in vitro and in individuals exposed to drinking water arsenic. *Environmental Health Perspectives*, 114(8), 1193-1198 (2006).
- <sup>10</sup> Sariñana-Ruiz YA, Vázquez-Arenas J, Sosa-Rodríguez FS, Labastida I, Armienta MA, Aragón-Piña A, Escobedo-Bretado M, González-Valdez LS, Ponce-Peña P, Ramírez-Aldaba H, Lara RH. Assessment of arsenic and fluorine in surface soil to determine environmental and health risk factors in the Comarca Lagunera, Mexico. *Chemosphere*, 178, 301-401 (2017).
- <sup>11</sup> Alarcón-Herrera MT, Bundschuh J, Nath B, Nicolli HB, Gutierrez M, Reyes-Gómez VM, Núñez D, Martín-Domínguez IR, Sracek O. Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *J Hazardous Materials*, 262, 960-969 (2013).
- <sup>12</sup> Armienta MA, Segovia N. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environ Geochem Health*, 30, 345–353 (2008).

- <sup>13</sup> Rocha-Amador DO, Calderón J, Carrizales L, Costilla-Salazar R, Pérez-Maldonado IN. Apoptosis of peripheral blood mononuclear cells in children exposed to arsenic and fluoride. *Environ Toxicol Pharmacol*, 32, 399–405 (2011).
- <sup>14</sup> Martínez-Acuña MI, Mercado-Reyes M, Alegría-Torres JA, Mejía-Saavedra JJ. Preliminary human health risk assessment of arsenic and fluoride in tap water from Zacatecas, México. *Environ Monit Assess*, 188, 476-489 (2016).
- <sup>15</sup> Espino-Valdés MS, Barrera-Prieto Y, Herrera-Peraza E. Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, Vol. III, 1, 8-18 (2009).
- <sup>16</sup> Reyes Cortés I, Reyes Cortés M, Villalba L, Montero Cabrera ME, Ledesma Ruiz R, Barrera Prieto Y, Precoma Mojarro AY, Vázquez Balderas J. Origen del As en las cuencas endorreicas, Chihuahua, México, *Geos*, 26 (1), 39 (2006).
- <sup>17</sup> Camacho LM, Gutiérrez M, Alarcón-Herrera MT, Villalba ML, Deng S. Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and Southwestern USA. *Chemosphere*, 83, 211-225 (2011).
- <sup>18</sup> González-Horta C, Ballinas-Casarrubias L, Sánchez-Ramírez B, Ishida MC., Barrera-Hernández AI, Gutierrez-Torres D, Zacarías O, Saunders RJ, Drobná Z, Méndez MA, García-Vargas G, Loomis D, Styblo M, del Razo LM. A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua, México. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 4587-4601 (2015).
- <sup>19</sup> Reyes-Gómez VM, Alarcón-Herrera MT, Gutiérrez M, Núñez López D. Fluoride and Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico: Contaminant Levels, Potential Sources, and Co-occurrence. *Water Air Soil Pollut*, 224:1433 (2013).
- <sup>20</sup> Bocanegra-Salazar M. Evaluación de riesgo en salud por la exposición a fluoruro y arsénico en agua de pozo para consumo de las zonas altiplano, centro y media del estado de San Luis Potosí. Tesis Maestría en Ciencias Ambientales, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 99p. (2006).
- <sup>21</sup> Cardona A, Banning A, Carrillo-Rivera JJ, Aguillón-Robles A, Rúde TR, Aceves-de-Alba J. Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated Tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77:121, 1-13. ISSN: 1866-6280 (Print) 1866-6299 (Online). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7273-1> (2018).
- <sup>22</sup> Banning A, Cardona A, Rúde TR. Uranium and arsenic dynamics in volcano-sedimentary basins –an exemplary study in north-central Mexico. *Applied Geochemistry* 27, 2160–2172 ISSN: 0883-2927, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.01.001> (2012).
- <sup>23</sup> Orozco-Esquivel MT, Nieto-Samaniego AF, Alaniz-Alvarez SA. Origin of rhyolitic lavas in the Mesa Central, Mexico, by crustal melting related to extension. *J Volcanol Geotherm Res.*, 118, 37–56 (2002).
- <sup>24</sup> Simons FS, Mapes-Vázquez E. Geology and ore deposits of the Zimapán mining district, State of Hidalgo, Mexico. USGS Prof Pap 284. (1956)
- <sup>25</sup> Armienta MA, Rodríguez R, Aguayo A, Cenicerros N, Villaseñor G, Cruz O. Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, México. *Hydrogeol J* 5:39–46 (1997).
- <sup>26</sup> Armienta MA, Villaseñor G, Rodríguez R, Ongley LK, Mango H. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. *Environ. Geol.*, 40, 571-581 (2001).
- <sup>27</sup> Sracek O, Armienta MA, Rodríguez R, Villaseñor G. Discrimination between diffuse and point sources of arsenic at Zimapán, Hidalgo state, Mexico. *J. Environ. Monit.*, 12, 329-337 (2010).
- <sup>28</sup> Vazquez-Alvarado P, Prieto-García F, Coronel-Olivares C, Gordillo-Martinez AJ, Ortiz-Espinosa RM, Hernandez-Ceruelos A. Fluorides and dental fluorosis in students from Tula de Allende Hidalgo, Mexico, *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences*, 2(3), 24-31 (2010).
- <sup>29</sup> Birkle P, Bundschuh J, Sracek O. Mechanisms of arsenic enrichment in geothermal and petroleum reservoirs fluids in Mexico. *Water Res.*, 44, 5605-5617 (2010).
- <sup>30</sup> Ortega-Guerrero A. Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, 26, 143-161 (2009).
- <sup>31</sup> Mählknecht J, Steinich B, Navarro de León I. Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environ. Geol.*, 45, 781–795 (2004).
- <sup>32</sup> Morales I, Villanueva-Estrada RE, Rodríguez R, Armienta MA. Geological, hydrogeological, and geothermal factors associated to the origin of arsenic, fluoride, and groundwater temperature in a volcanic environment “El Bajío Guanajuatense”, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5403–5415. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4554-9> (2015).
- <sup>33</sup> Esteller MV, Rodríguez R, Cardona A, Padilla-Sánchez L. Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: Case studies from Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5725–5741. <http://doi.org/10.1007/s10661-011-2376-0> (2012).
- <sup>34</sup> Morán-Ramírez J, Ledesma R, Mählknecht J, Ramos J. Rock–water interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling. *Appl. Geochem.*, 68, 79-94 (2016).
- <sup>35</sup> Hurtado-Jiménez R, Gardea-Torresdey JL. Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico. *Revista Panamericana de Salud Pública = Pan American Journal of Public Health*, 20(4), 236–247. <http://doi.org/10.1590/S1020-49892006000900004> (2006).
- <sup>36</sup> Hurtado-Jiménez R, Gardea-Torresdey JL. Estimación de la exposición a fluoruro en Los Altos de Jalisco, México, *Salud Pública de México*, 47, no. 1 pp 58-63 (2005).
- <sup>37</sup> Juárez LA, Murrieta PF, Molina FN, Huízar AR, Aguilera CY, Querétaro 1.pdf. *ORAL*, 11(35), 650–653 (2010). Retrieved from <http://www.medigraphic.com/pdfs/oral/ora-2010/ora1035g.pdf>
- <sup>38</sup> García-Nieto E, Carrizales-Yañez L, Juárez-Santacruz L, García- Gallegos E, Hernández-Acosta E, Briones-Corona E, Vázquez-Cuecuecha OG. Plomo Y Arsénico En La Subcuenca Del Alto Atoyac En Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII(1), 7–17. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.040> (2011).
- <sup>39</sup> Mendoza-Cano O, Sánchez-Piña RA, Barrón-Quintana J, Cuevas-Arellano HB, Escalante-Minakata P, Solano-Barajas R. Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Publica de Mexico*, 59(1), 34–40 <https://doi.org/10.21149/8413> (2017).

- <sup>40</sup> Méndez-Ramírez M, Armienta-Hernández M. A. Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2), 450–462 (2012).
- <sup>41</sup> Caballero PUG, Carrillo JCR, Gómez RMU, Jerez MPS. Presencia de Arsénico en Pozos y en Cultivos en Oaxaca, México. *Agronomía Mesoamericana*, 21(1), 177–184. Retrieved from <http://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v21n1/a18v21n1.pdf> (2010).
- <sup>42</sup> Aragón-Sulik MIM, Nacional IP, Nacional IP. Distribución geográfica de arsénico en acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca , México Geographic distribution of arsenic in the aquifer of Central Valley , Oaxaca , Mexico, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1), 102–110 (2015).
- <sup>43</sup> Mendoza-Amézquita E., Seim AJ. Calidad del agua subterránea en Salina Cruz, Oaxaca, *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencia*, 7(16): 33-45 (2016).



## CAPÍTULO 2. INVENTARIO NACIONAL DE CALIDAD DEL AGUA

### BASES Y ANTECEDENTES DE LA INICIATIVA INCA

Juan Manuel Ledón

La integración del Inventario Nacional de Calidad del Agua (INCA) surge como una iniciativa ciudadana promovida por la Comisión de Hábitat, Medio Ambiente y Sostenibilidad (CHMAS) y el sector científico, académico, de sociedad civil y de emprendimiento socioambiental en México; en colaboración con la Gerencia de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).



Figura 2.1. Identidad de la iniciativa INCA. Diseño de logo por Luis Felipe Castillón.

El propósito de esta iniciativa consiste en visibilizar y ofrecer información confiable, relevante, útil y actualizada sobre la calidad del agua de uso y de consumo humano a nivel nacional, con un enfoque inicial en la identificación de zonas y localidades que presentan altas concentraciones de arsénico y/o fluoruro en aguas subterráneas. En coordinación con la red de colaboración de la CHMAS y los actores locales, municipales, estatales y federales correspondientes, se busca que esta información contribuya a generar acciones orientadas a la atención prioritaria de estas zonas y localidades, así como a la comunicación de riesgo, la vinculación y la incidencia en el diseño de políticas públicas.

#### Antecedentes

En octubre de 2015 comenzó formalmente el proceso de diálogo entre la CONAGUA y la CHMAS, el cual se ha mantenido hasta la fecha. En este proceso han participado destacados investigadores, expertos y representantes de distintas universidades y centros de investigación, de Organizaciones de la Sociedad Civil (OSC) y de emprendimiento socioambiental, de la propia CONAGUA, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y de la Secretaría de Gobernación (SEGOB). Derivado de este proceso, se han logrado establecer los siguientes acuerdos clave:

1. Diseñar e implementar un programa piloto de atención a zonas y localidades prioritarias afectadas por la contaminación de arsénico, fluoruro y otros elementos en agua de consumo humano detectados en al menos 23 estados<sup>1</sup> del país .
2. Consolidar y actualizar el Sistema de Información de Calidad de Agua (SICA) a través de un Inventario Nacional de Calidad de Agua que permita generar mapas de riesgo y alertas por contaminación a nivel estatal, municipal y local.
3. Abrir líneas de investigación enfocadas en el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas para atender la problemática a nivel nacional.
4. Conformar un comité interinstitucional de seguridad hídrica con representantes de la SEGOB, la CONAGUA, la CHMAS, la Secretaría de Salud, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la SEMARNAT, el Poder Legislativo, gobiernos estatales y municipales, organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento, OSC y el sector científico-académico.

En seguimiento a estos acuerdos, en abril de 2016 la CONAGUA emitió una demanda (solicitud) a CONACYT<sup>2</sup>, quien a su vez abrió una convocatoria para la “evaluación de la exposición humana a arsénico, fluoruro y radiactividad a través del uso y consumo de agua subterránea”. La Fundación Cántaro Azul, A.C., el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Unidad Durango y Chihuahua, el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav), el IMTA, la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) participaron en la convocatoria y elaboraron una propuesta de manera conjunta; la cual fue aprobada con base al criterio de pertinencia. En enero de 2017 se anunció que no serían ejercidos recursos para propuestas de dicha convocatoria. Sin embargo, este mismo conjunto de instituciones y organizaciones decidieron continuar - con recursos propios - el proceso de integración del INCA, considerando los datos proporcionados por la Gerencia de Calidad del Agua de la CONAGUA, así como las aportaciones y los datos recopilados de diversos estudios y tesis de centros de investigación, universidades, laboratorios nacionales e internacionales, organizaciones de la sociedad civil, entre otros, que cumplen con los criterios de confiabilidad y de validación establecidos<sup>3</sup>.

El 19 de abril de 2017 se llevó a cabo la sesión de presentación y lanzamiento formal de la iniciativa INCA en las instalaciones de la Unidad para el Desarrollo Político y Fomento Cívico de la SEGOB, con la participación de representantes de las instituciones integrantes de la red de colaboración de la CHMAS e invitados especiales. Desde entonces, se estableció una estructura organizacional con los siguientes roles y responsabilidades:

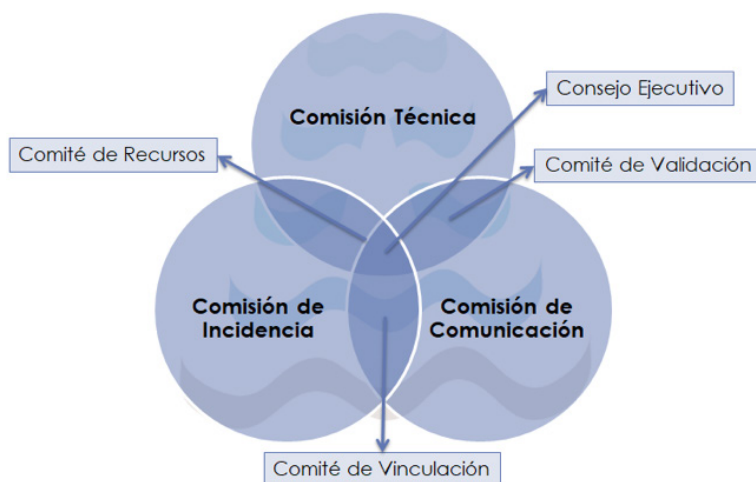


Figura 2.2. Estructura organizacional de la iniciativa INCA.

- **Comisión técnica:** integra, analiza y mantiene actualizada la base de datos; establece criterios de validación y priorización; genera reportes y mapas.
- **Comité de validación:** evalúa y vigila la calidad de los datos y de la información; determina niveles de confiabilidad y prioridad.
- **Comisión de comunicación:** define e implementa estrategias a través de medios, herramientas, plataformas y tecnologías de información y comunicación.
- **Comité de vinculación:** identifica y construye relaciones con actores clave.
- **Comisión de incidencia:** genera estrategias de visibilidad y articulación para el manejo efectivo e intercambio de información con instancias públicas.
- **Consejo ejecutivo:** define, coordina, asesora y vigila el cumplimiento de los planes y las acciones estratégicas.
- **Comité de recursos:** procura fondos; gestiona y administra recursos humanos, tecnológicos y financieros.

Entre los avances y acontecimientos más destacados relacionados a la iniciativa INCA y la CHMAS se pueden mencionar los siguientes:

- El acuerdo entre la SEGOB y la CHMAS (8/may/2018) para la realización del presente libro, como primero de dos tomos de la serie “Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua”.
- La colaboración con el Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuática<sup>4</sup> para la generación y publicación de mapas de concentraciones de arsénico y fluoruro en aguas subterráneas en México, a través de la plataforma GAP Maps ([www.gapmaps.org](http://www.gapmaps.org)).
- La colaboración con la Red temática CONACYT de Salud Ambiental Infantil (Red SAI) para la generación y actualización de mapas, reportes e información relativa al Atlas de Riesgo de Salud Ambiental Infantil en México.
- El vínculo con la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la CONAGUA para el diseño de un proyecto piloto de sistemas de captación pluvial y modelos de agua segura en escuelas y espacios comunitarios estratégicos de Salitral de Carrera, Villa de Ramos, y La Reforma, Salinas de Hidalgo, del Estado de San Luis Potosí (ambas, consideradas en el INCA como localidades prioritarias por las altas concentraciones de fluoruro y arsénico en el agua subterránea<sup>5</sup>).
- El vínculo con la organización Caminos de Agua para su participación en una convocatoria de FGRA<sup>6</sup> que permitió equipar participativamente con sistemas de captación, almacenamiento, distribución y tratamiento del agua de lluvia a las comunidades de Pozo Hondo y La Vaciada del municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, en las cuales se detectaron altas concentraciones de fluoruro y arsénico en el agua subterránea<sup>7</sup> (el proyecto comenzó a ejecutarse en 2018).
- La participación de representantes del INCA en el Primer Congreso Internacional de Calidad del Agua: efectos en la salud, remediación y perspectivas (20–22/sep/2017) en la Universidad Autónoma de Chihuahua; así como en el Open Data Day (3/mar/2018) en la Ciudad de México, entre otros foros, congresos y eventos.

En los siguientes pasos de esta iniciativa, se contempla fortalecer las líneas de acción y las bases existentes, crear nuevas alianzas estratégicas y consolidar las colaboraciones, así como sumar esfuerzos entre los distintos sectores para generar estrategias efectivas de visibilidad, comunicación,

vinculación e incidencia en políticas públicas que permitan enfrentar los retos y extender el alcance en materia de calidad del agua y seguridad hídrica a nivel nacional.

## Referencias

- <sup>1</sup> Al momento de establecer el acuerdo, se habían identificado 20 estados. Considerando los datos actualizados de CONAGUA al 2017, hasta el momento se han identificado 23 estados con concentraciones de fluoruro y/o arsénico fuera de la modificación a la NOM 127 (2000).
- <sup>2</sup> A través del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua CONAGUA-CONACYT.
- <sup>3</sup> Los criterios de confiabilidad y de validación consideran los métodos de control de calidad analíticos y los límites de detección y cuantificación propios de los métodos analíticos empleados.
- <sup>4</sup> Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology ([www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)).
- <sup>5</sup> Véanse las concentraciones de fluoruro y arsénico correspondientes en la tabla de la sección 2.3 del presente libro.
- <sup>6</sup> Convocatoria 11° (2017-2018) "Agua de calidad para comunidades marginadas" del Programa Agua de Fundación Gonzalo Río Arronte.
- <sup>7</sup> Véanse las concentraciones de fluoruro y arsénico correspondientes en la tabla de la sección 2.3 del presente libro.

## SITUACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO

María Catalina Alfaro de la Torre, María Aurora Armienta y María Deogracias Ortiz Pérez

En el país, se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo. Datos de 2018 indican que varios de ellos muestran un grado alto de sobreexplotación sobre todo en el Centro y Norte de México, mayormente árido, donde el agua subterránea es, en muchos casos, la única fuente de agua para uso y consumo humano<sup>1</sup>; un total de 246 acuíferos muestran algún grado de sobre extracción, 105 se consideran sobreexplotados, 32 son de agua salobre (enriquecidas en sales cuando el agua tiene contacto con formaciones sedimentarias antiguas, de origen marino y evaporítico) y 18 con intrusión de agua salada marina<sup>2,3</sup>. Del total de agua concesionada para usos consuntivos, el 39% procede del agua subterránea.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)<sup>3</sup>, en 2016, el 14.5% del agua en México se destina al abastecimiento público y mayormente proviene de aguas subterráneas (8.5%). Por otra parte, el 76% del agua en el país se concesiona para uso agropecuario, 27.5% proviene de aguas subterráneas. Díaz y colaboradores,<sup>4</sup> sostienen que el 75% del agua que se consume en las ciudades viene del subsuelo. Estos resultados dejan ver que existe una gran presión sobre los recursos de agua subterránea y se ha resaltado que ésta es particularmente crítica en las regiones del Bajío, la Comarca Lagunera y el Centro-Oeste del estado de Chihuahua<sup>4</sup>. La presión sobre los sistemas acuíferos no se limita solo al uso urbano y doméstico, ya que la agricultura ejerce aún una presión mayor pues más del 70% del agua concesionada se destina a usos agropecuarios, particularmente en las zonas áridas y semiáridas; la sobreexplotación de los acuíferos deriva en la extracción de aguas salobres de menor calidad, para los usos a que se destine. Un dato relevante de la situación mexicana proviene del hecho que la población no sólo se ha cuadruplicado en los últimos sesenta años sino que también el mayor crecimiento poblacional y económico se ha presentado en las regiones áridas y semiáridas del país (Centro y Norte) con solo el 31% de agua renovable y donde se concentra cerca del 80% de la población, en contraste con el Sur y Sureste que tiene un 69% de agua renovable<sup>4</sup>. Estos autores hacen un análisis de la información sobre las concesiones de agua del Registro Público de Derechos del Agua (REPDACONAGUA) determinando que, de 314 292 derechos de agua, el 76% del volumen concesionado es extraído para fines agrícolas lo cual corresponde a lo reportado recientemente por la CONAGUA<sup>3</sup> quien resalta también que 4.4% se destina al uso industrial.

Según datos de DOF-SEMARNAT<sup>1</sup>, hasta diciembre de 2015 la disponibilidad media de agua era mayor en el Sur, Sureste de México (Figura 2.3) y fuertemente limitada en el Centro y Norte del país (Figura 2.4) mayormente en las Regiones Hidrológicas Río Bravo (VI) seguida de Lerma Santiago Pacífico (VIII) y en las Cuencas Centrales del Norte (VII).

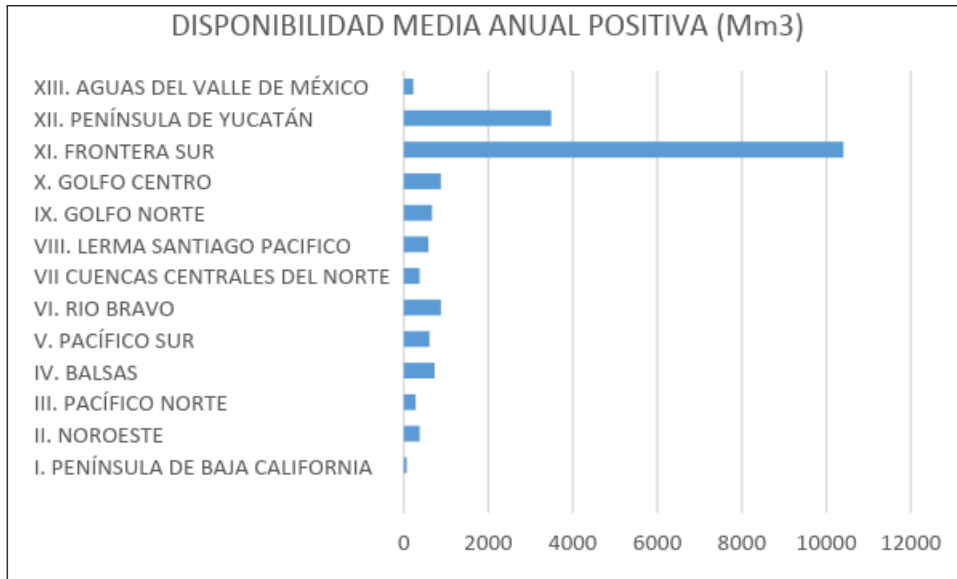


Figura 2.3. Disponibilidad media anual de agua (DMA) por Región Hidrológica Administrativa hasta diciembre de 2015. Elaborada con datos obtenidos de DOF.

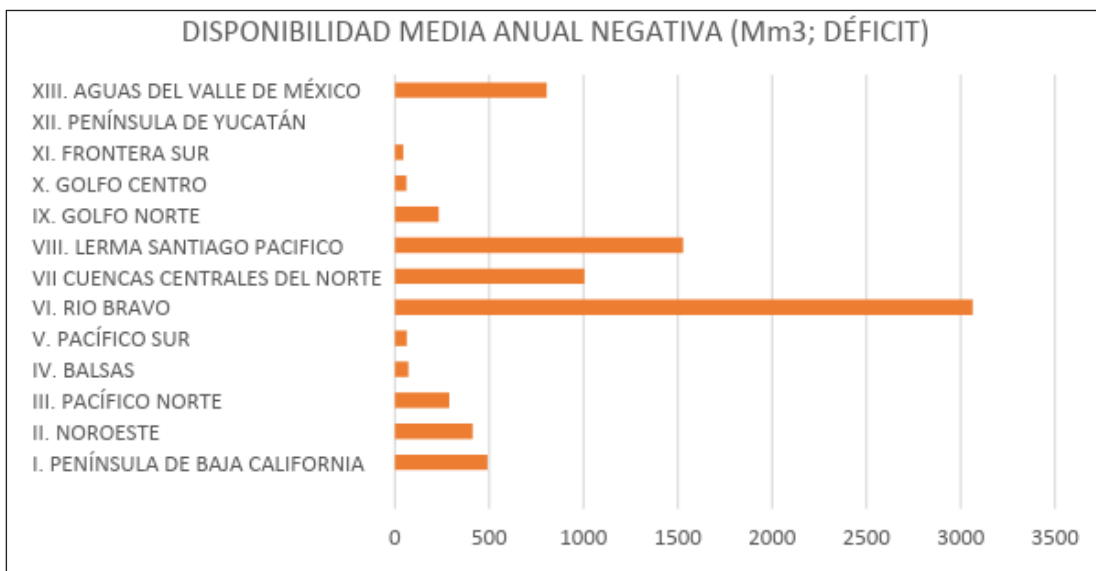


Figura 2.4 Déficit medio anual de agua por Región Hidrológica Administrativa hasta diciembre de 2015. Elaborada con datos obtenidos de DOF-SEMARNAT (2018).

La disponibilidad entonces pareciera estar relacionada sólo con la cantidad del recurso, sin embargo, la problemática es mayor cuando consideramos su calidad. Un número alto de estudios apuntan hacia una contaminación natural y posiblemente inducida por la alta extracción del agua, mayormente debida a fluoruros y arsénico, en concentraciones superiores a las consideradas de riesgo por la Normativa Nacional. Carmona y colaboradores<sup>2</sup>, indican que el 60% del país consume agua con contenidos de fluoruro superiores a la normativa para agua de uso y consumo humano y que en varias regiones del país, el agua que se destina al abasto doméstico contiene arsénico. La presencia de fluoruro y arsénico en el agua para uso y consumo humano genera una condición asociada a serios problemas de salud resaltados por varios estudios<sup>5,6,7,8,9</sup>. El origen del fluoruro y arsénico en las aguas subterráneas es geológico pero algunos trabajos proponen que las sequías

prolongadas merman la disponibilidad del agua e inciden en un incremento de la concentración de estas sustancias. En la Sección 1.3 en este libro, se hace referencia a trabajos que sugieren que concentraciones altas de fluoruro y/o arsénico, además de su origen geológico, podrían estar relacionadas con diferentes condiciones naturales y/o antrópicas que afectan a los sistemas de aguas subterráneas. Los estudios sugieren una contribución de arsénico de fuentes antrópicas en algunos de los sitios estudiados (minería, riego con agua contaminada) mientras que en el caso de la presencia de fluoruro parecen estar completamente relacionados con la geología en los sistemas acuíferos y condiciones hidrotermales.

### Tratamiento del agua subterránea para su potabilización

Existe diversa información sobre la calidad de las aguas subterráneas aunque la Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS) reconoce que es menos costoso tratar este tipo de agua para su distribución a la población también resalta la dificultad que representa el que contenga sales y compuestos tóxicos para la salud humana. Se reconoce que el principal proceso que se aplica a estas aguas es la desinfección logrando una cobertura del 90% en 2007. En algunos sitios se han implementado métodos basados en el uso de adsorbentes (zeolitas) para remover sustancias como manganeso<sup>10</sup>. En otros se han instalado para eliminar arsénico que han presentado diversos problemas para proporcionar agua de calidad adecuada a la población como se reporta en las localidades que se incluyen en este libro.

En su Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, la CONAGUA<sup>11</sup> propone que los principales procesos de tratamiento que pueden aplicarse al agua subterránea dependiendo de su calidad son: a) Tratamiento convencional ablandador con cal-carbonato; b) Suavización con membranas; c) Tratamiento para la remoción de gas; d) Tratamiento para la remoción de hierro y manganeso. Los procesos para remover arsénico y/o fluoruro se abordan en el capítulo 4 de este libro.

### Referencias

- <sup>1</sup> Diario Oficial de la Federación-SEMARNAT. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. Fecha de publicación 4 de Enero de 2018. México, 22p.
- <sup>2</sup> Carmona Lara C, Carrillo Rivera JJ, Hatch Kuri G, Huizar Álvarez R, Ortega Guerrero MA. Ley del Agua Subterránea: una propuesta. Impreso en Impretei S.A. de C.V., Ciudad de México, 87p. (2017).
- <sup>3</sup> CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2017. Comisión Nacional del Agua, México. Recuperado el 27 de Julio de 2018. [[http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)]
- <sup>4</sup> Díaz Caravantes RE, Bravo Peña LC, Alatorre Cejudo LC, Sánchez Flores E. Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 82, 93-103 (2013).
- <sup>5</sup> Rocha D, Navarro M, Carrizales L, Morales R, Calderón J. Decreased intelligence in children and exposure to fluoride and arsenic in drinking water. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 23 Sup 4, S579-S587 (2007).
- <sup>6</sup> González C, Ballinas L, Sánchez B, Ishida M, Barrera A, Gutiérrez D, Zacarias O, Jesse R, Drobná Z, Méndez M, García G, Loomis D, Stýblo M, Del Razo LM. A Concurrent Exposure to Arsenic and Fluoride from Drinking Water in Chihuahua, Mexico. Int. J. Environ. Res. Public Health, 12, 4587-4601 (2015).
- <sup>7</sup> Irigoyen M, García A, Mejía A, Huizar R. Nutritional status and dental fluorosis among schoolchildren in communities with different drinking water fluoride concentrations in a central region in Mexico. Sci Total Environ, 541, 512–519 (2016).
- <sup>8</sup> Aguilar F, Morales F, Cintra A, Fuente J. Prevalence of dental fluorosis in Mexico 2005-2015: a literature review. Salud Pública de México, 59(3), 306-3013 (2017).
- <sup>9</sup> Limón-Pacheco JH, Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Sánchez Retana IM, Gonsebatt ME, Del Razo LM. Potential Co-exposure to Arsenic and Fluoride and Biomonitoring Equivalents for Mexican Children. Annals of Global Health. 84(2): 257–273 (2018).
- <sup>10</sup> ANEAS. El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas. R. Olivares, R. Sandoval, Coordinadores. 348p, (2008).
- <sup>11</sup> CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada. México, D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 345p, (2016).

## CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO Y FLUORURO EN AGUA SUBTERRÁNEA

María Catalina Alfaro de la Torre, María Deogracias Ortiz Pérez, María Teresa Alarcón, Diego Armando Martínez Cruz y Juan Manuel Ledón

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)<sup>1</sup> indicó que en 2015 se tenía una cobertura de agua potable a nivel nacional de 94.4% diferenciando como 97.2% en el nivel urbano y 85% en el nivel rural entendiéndose que estos datos corresponden a que la población cuenta con agua entubada en la vivienda o predio; se identificaron a los Estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz como los de mayor rezago en cuanto a la cobertura de agua potable. La información citada se obtiene de datos censales pero no refleja la realidad nacional en cuanto a la calidad de agua que recibe la población.

En 2016, la Red Nacional de Monitoreo incluyó 1080 sitios en aguas subterráneas. La Red también hace mediciones en aguas superficiales las cuales incluyen Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), parámetros con los cuales se calcula el Índice de Calidad del Agua; en 74 cuerpos de agua se realizan estudios especiales.

En aguas subterráneas se utiliza a los Sólidos Disueltos Totales (SDT) como parámetro principal de la medición de la calidad del agua, ya que permiten distinguir entre las aguas dulces y salobres. Según la Dra. Blanca Jiménez-Cisneros<sup>2</sup>, investigadora de la Universidad Nacional Autónoma de México la mayor problemática de la calidad de las aguas subterráneas se debe a la presencia de manganeso, hierro, plomo, cromo, mercurio, fluoruro, arsénico, cloruros, sulfatos, y bacterias coliformes por infiltración de aguas negras; sin embargo, los estudios de calidad del agua de los acuíferos que incluyan estos parámetros son pocos como también lo son las acciones para generar agua potable a partir de los cuerpos de agua en donde se ha detectado algún tipo de contaminación. Actualmente, el tratamiento principal que recibe el agua subterránea es la desinfección que es la forma como la autoridad federal la entrega a las autoridades locales encargadas del suministro a la población. Definitivamente, este tipo de tratamiento resuelve esencialmente el problema de contaminación por bacterias, pero no tiene impacto en la remoción de contaminantes inorgánicos como los metales, el arsénico, el fluoruro, estos últimos reconocidos por su importancia en la salud humana.

En cuanto a agua y salud, la CONAGUA<sup>1</sup> reporta que, a consecuencia del incremento de cobertura de agua entubada, alcantarillado y saneamiento, la tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de cinco años disminuyó de 122.7 a 7.3 por cada 100 000 habitantes entre 1990 y 2015. A nivel nacional se tiene aún poca información sobre la problemática de salud debida a otros contaminantes presentes en el agua que recibe la población y que posiblemente consume sin conocer a lo que está expuesta. En regiones del país donde se sabe de problemas de contaminación del agua se ha recomendado a la población de consumir agua purificada, sin embargo, dada la desigualdad social que existe no es posible pensar que todos los habitantes puedan acceder a un recurso de mejor calidad como lo sería el agua purificada.

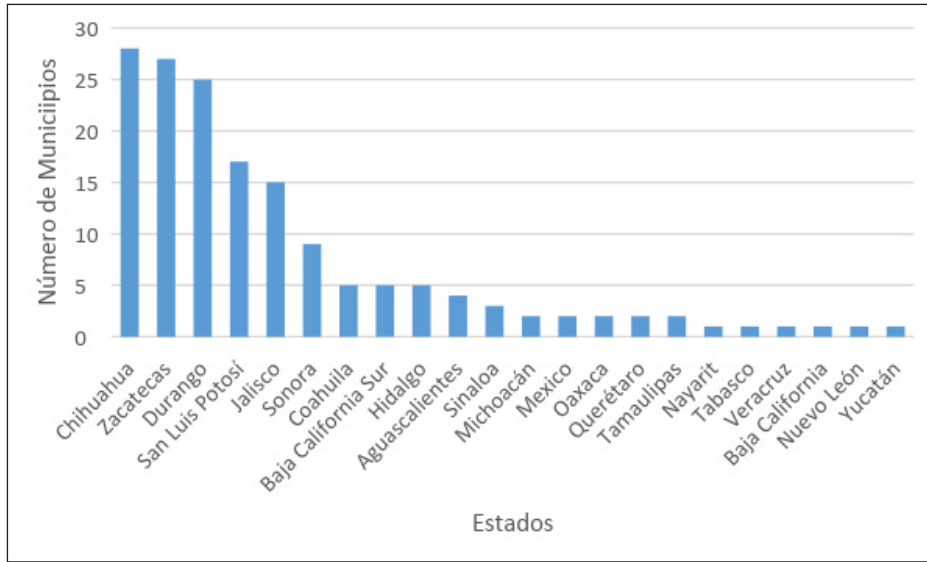
Así, en un esfuerzo por entender cómo es la problemática nacional en cuanto a la calidad del agua y la presencia de sustancias tóxicas principalmente la de origen subterráneo, el Inventario Nacional de Calidad de Agua integra una base de datos nacional con información de diferentes parámetros de la calidad del agua, mayormente de arsénico y fluoruro, dos contaminantes que varias investigaciones de diferentes Instituciones incluyendo los datos oficiales de CONAGUA,

han reportado en concentraciones superiores a lo que marca la Normativa Nacional para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental, 2000) que corresponden a 0.025 mg/L para arsénico y 1.5 mg/L para fluoruro. El esfuerzo de generar una Base de Datos Nacional se debe a que muy pocos estudios de la calidad del agua se hacen públicos, y los que se conocen mayormente reportan calidad bacteriológica, SDT y cloro residual.

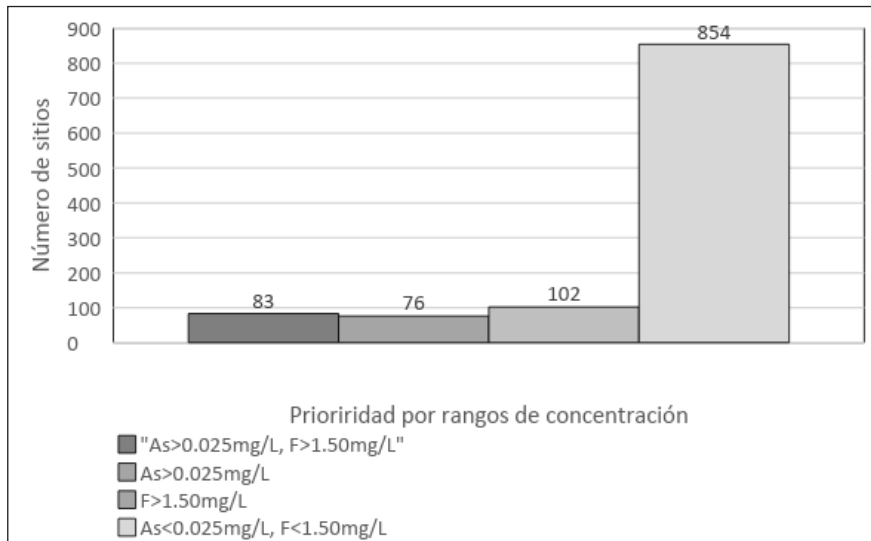
De los datos que se han registrado, es posible distinguir sitios o localidades en que las fuentes de agua tienen concentraciones tanto de arsénico como de fluoruro superiores a lo que indica la NOM-127 (Tabla 2.1), aquéllos en que solamente arsénico está fuera de Norma (Tabla 2.2), y los que solamente el fluoruro está fuera de Norma (Tabla 2.3). Finalmente, sitios o localidades en que las concentraciones de ambas sustancias son inferiores a las indicadas en la NOM-127, aunque habría que puntualizar que algunos casos podrían no cumplir con la Normativa Internacional que marca la Organización Mundial de la Salud y que corresponde a 0.010 mg/L para arsénico y 0.7 mg/L para fluoruro. Recientemente la NOM-127 fue revisada y está en proyecto una nueva Norma en donde se propone que la concentración de arsénico máxima permitida será de 0.010 mg/L mientras que para fluoruro las concentraciones disminuirán gradualmente hasta alcanzar una concentración de 1.0 mg/L. De lo anterior se deduce que al entrar en vigor la nueva Norma, el panorama del suministro de agua potable será aún más preocupante que lo que se muestra en las tablas.

Las Tablas 2.1-2.3 muestran que hay presencia de arsénico y/o fluoruro en agua subterránea, en localidades de **ciento setenta municipios** ubicados en **veintitrés estados** en el país. Como se podrá apreciar en las Tablas, los estados con un mayor número de municipios con algún grado de afectación por la presencia de arsénico y/o fluoruro en el agua subterránea son: Chihuahua (28), Zacatecas (27), Durango (25), San Luis Potosí (17), Jalisco (15) y Sonora (9) correspondiendo al 71.2% de los municipios del país afectados por los contaminantes indicados. En los Estados de Coahuila de Zaragoza, Baja California Sur, Hidalgo, cinco municipios en cada uno tienen localidades cuyas aguas subterráneas están contaminadas, mientras que en los catorce Estados restantes localidades en cuatro o menos municipios están afectadas por la presencia de arsénico y/o fluoruro en el agua, como se muestra en la Figura 2.5.

Con respecto de las concentraciones, existen fuentes de agua altamente contaminadas con arsénico y/o fluoruro como se podrá apreciar en las Tablas 2.1-2.3. Considerando solo los datos oficiales proporcionados por CONAGUA para el año de 2017, de un total de 1,116 muestras analizadas, el 23.4% presentaban concentraciones de arsénico y/o fluoruro fuera de Norma como se podrá apreciar en la Figura 2.6. Su monitoreo abarca los 32 estados del país y aproximadamente 380 municipios donde tienen establecidos sitios de muestreo para aguas subterráneas. Utilizando estos mismos datos, las figuras 2.7 y 2.8 muestran la distribución de sitios para los cuales se ha determinado algún grado de contaminación por arsénico y/o fluoruro en agua subterránea, en México. Los datos representados en las figuras corresponden a los generados por la instancia oficial, para el año 2017.



**Figura 2.5.** Estados del país en los cuales existen localidades cuya agua subterránea está afectada por algún grado de contaminación por arsénico y/o fluoruro en el agua subterránea a concentraciones mayores a 0.025mg de arsénico/L y/o 1.5mg de fluoruro /L.



**Figura 2.6.** Rangos de concentración de arsénico y fluoruro determinados en muestras de agua subterráneas por CONAGUA en la Red de Monitoreo Nacional, para el año 2017.

**Tabla 2.1.** Localidades con concentraciones de arsénico y fluoruro en agua subterránea superiores a 0.025mgAs/L y 1.5mgF/L establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, 2000, para agua de uso y consumo humano.

| Estado                   | Municipio   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>  | Arsénico mg/L       | Fluoruro mg/L         | Institución Responsable (año)         |
|--------------------------|---|---|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Aguascalientes           | Cosío   | Pozo Cosío  | 0.045               | 1.52                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Aldama  | San Diego de Alcalá-Manantial   | 0.183               | 6.57                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Allende   | San Antonio del Alto Corralejo y San Juan de Allende                                | 0.029-0.048         | 1.93-2.62             | CINVESTAV, IPN (2008)                 |
|                          | Ascensión   | Palomas-Guadalupe Victoria 1  | 0.091               | 2.42                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Camargo   | Ejido Las Cuevas, Meoqui-Delicias Pozos y La Laguna de las Vacas                    | 0.026-0.086         | 1.68-3.07             | CONAGUA (2017); CINVESTAV, IPN (2009) |
|                          | Chihuahua   | Guadalupe   | 0.114               | 3.83                  | CINVESTAV, IPN (2008)                 |
|                          | Delicias  | Colonia Francisco I. Madero, Miguel Hidalgo y La Merced                             | 0.027-0.053         | 1.51-1.72             | CINVESTAV, IPN (2009); CONAGUA (2017) |
|                          | Galeana   | Buenaventura 3  | 0.029               | 2.64                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Julimes   | Cd. Julimes; El Carrizo, El Gramal, Labor Nueva, La Regina y Pozo Meoqui-Delicias 2 | 0.042-0.105         | 1.97-4.58             | CONAGUA (2017); CINVESTAV, IPN (2009) |
|                          | Jiménez   | Ejido Lote Ocho (Lugo), Miramontes y Laguna de Palomas                              | 0.041-0.149         | 2.22-3.44             | CONAGUA (2017); CINVESTAV, IPN (2009) |
|                          | La Cruz   | Pozo Meoqui-Delicias 3  | 0.111               | 1.95                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Meoqui  | Varios pozos del municipio  | 0.033- <b>0.428</b> | 1.91-9.80             | CONAGUA (2017); CINVESTAV, IPN (2009) |
|                          | Namiquipa   | Benito Juárez   | 0.338               | 1.60                  | CINVESTAV, IPN (2010)                 |
|                          | Nuevo Casas Grandes   | Pozo Casas Grandes 2  | 0.025               | 4.59                  | CONAGUA (2017)                        |
|                          | Ocampo  | Entronque las Estrellas   | 0.206               | 6.81                  | CINVESTAV, IPN (2011)                 |
|                          | Rosales   | Barranco Blanco, Kilómetro 99, Orinda, Salón de Actos y Pozo Meoqui-Delicias 15-A   | 0.026-0.169         | 1.47-8.55             | CINVESTAV, IPN (2012)                 |
| San Francisco de Conchos | El Tigre  | 0.030   | 1.71                | CINVESTAV, IPN (2009) |                                       |
| Satevó                   | La Joya   | 0.144   | 3.71                | CINVESTAV, IPN (2009) |                                       |
| Saucillo                 | Estación Conchos, San Francisco del Mezquital, Santa Gertrudis y Pozo Meoqui-Delicias (M-8) | 0.042-0.070   | 1.58-2.97           | CINVESTAV, IPN (2011) |                                       |

### Chihuahua

| Estado                | Municipio   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup> | Arsénico mg/L                | Fluoruro mg/L  | Institución Responsable (año) |                              |
|-----------------------|---|----------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Coahuila de Zaragoza  | Torreón   | Pozo 369 Albia                   | 0.209                        | 1.98           | CONAGUA (2017)                |                              |
|                       | Viesca  | Pozo Glilita 2                   | 0.046                        | 1.75           | CONAGUA (2017)                |                              |
|                       | Canatlán  | Pozos Nicolás Bravo y Canacatlán | 0.039-0.103                  | 3.38-4.38      | CONAGUA (2017)                |                              |
|                       | Cuencamé  | Pozo Cerro de Santiago           | 0.100                        | 1.65           | CONAGUA (2017)                |                              |
|                       | Durango   |                                  | Pozo Colonia Hidalgo         | 0.160-0.242    | 9.33- 11.89                   | UASLP (2001); CONAGUA (2017) |
|                       |   |                                  | Pozo 5 de Febrero            | 0.202          | 10.27                         | UASLP (2001)                 |
|                       |   |                                  | Lázaro Cárdenas (Pozo)       | 0.131-0.148    | 11.29-12.98                   | UASLP (2001); CONAGUA (2017) |
|                       |   |                                  | Ciudad; Pozos varios         | 0.025-0.057    | 2.27-5.72                     | UASLP (2003); CONAGUA (2017) |
|                       |   |                                  | Pozo Dieciséis de Septiembre | 0.290          | <b>45.21</b>                  | CONAGUA (2017)               |
|                       | El Oro  | Pozos: Baylón y Puerto Pinto     | 0.039-0.051                  | 1.63-2.12      | CONAGUA (2017)                |                              |
| General Simón Bolívar | Pozo 1 La Esperanza   | 0.048                            | 1.79                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Gómez Palacios        | Pozo CNA 4840   | 0.121                            | 1.91                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Indé                  | Pozo Las Delicias   | 0.129                            | 2.57                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Mapimí                | Pozo 47 Las Palmas  | 0.238                            | 2.78                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Mezquital             | Pozo El Mezquital   | 0.068                            | 4.53                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Nombre de Dios        | Pozo La Parrilla  | 0.026                            | 2.73                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Nuevo Ideal           | Pozo Nuevo Ideal 1  | 0.120                            | 2.56                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Peñón Blanco          | Pozos: J. Agustín Castro, Luis Moya, Yerbánis, 3, Covadonga y Las Cuestas | 0.067-0.239                      | 1.53-13.30                   | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Poanas                | Pozo Villa Unión 3  | 0.027                            | 2.97                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Rodeo                 | Pozo Rodeo  | 0.039                            | 1.73                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| San Bernardo          | Pozo San Bernardo   | 0.051                            | 4.57                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| San Juan del Río      | Pozo Toledo   | 0.031                            | 4.32                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Santiago Papasquiaro  | Pozos: Valle Dorado, El Tagarete, La Huerta y La Estancia                 | 0.040-0.370                      | 1.90-5.89                    | CONAGUA (2017) |                               |                              |
| Tepehuanes            | Pozo San José de la Boca  | 0.028                            | 2.24                         | CONAGUA (2017) |                               |                              |

| Estado                     | Municipio   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>   | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L      | Institución Responsable (año)                                      |
|----------------------------|---|--|---------------|--------------------|--|
| <b>Guanajuato</b>          | Abasolo   | Abasolo y Tamazula   | 0.025-0.029   | 3.90-8.10          | UASLP (2001)   |
|                            | Cuerámaro   | 18 De Marzo y Cerrito de Agua Caliente   | 0.160-0.170   | 3.15-4.33          | CONAGUA (2017)   |
|                            | Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional | Siete Reales   | 0.050         | 5.70               | Texas A&M University (2015)  |
|                            | Irapuato  | Comunidad San José de la Estacada  | 0.149         | 1.56               | CONAGUA (2017)   |
|                            |   | Aldama y Guadalupe Paso Blanco   | 0.050-0.077   | 2.89-4.95          | UASLP (2001)   |
|                            | San Diego de la Unión                             | Ex-Hacienda de Jesús, La Cabaña del Rey, San Antonio de Lourdes y Terreros de la Concepción  | 0.025-0.063   | 4.83- <b>23.40</b> | Caminos de Agua (2016) / Northern Illinois University (2013, 2014) |
|                            | San Luis de la Paz                                | Pozo Blanco 2, Rancho de Guadalupe 1 y 2, y, Pozo Hondo  | 0.028-0.120   | 3.31-5.88          | CONAGUA (2017); Northern Illinois University (2013)                |
|                            | San Miguel de Allende                             | Agua Refill Station Insurgentes, Atonilco, Cieneguilla, Colonia Olimpo, Colonia Providencia, Colonia San Luis Rey, Colonia San Rafael, Lomas de Concinas y Los López | 0.025-0.080   | 1.71-5.13          | Caminos de Agua (2014-2017) / Texas A&M University (2016)          |
|                            |   | Silao de la Victoria   | 0.033         | 5.65               | CONAGUA (2017)   |
|                            |   | Atonilco El Alto   | 0.045         | 1.97               | CONAGUA (2017)   |
| <b>Jalisco</b>             | Ayotlán   | Pozos 687 y Parque Acuático Santa Rita   | 0.051-0.127   | 4.00-8.99          | CONAGUA (2017)   |
|                            | Ixtlahuacán de los Membrillos                     | Atequiza 2   | 0.029         | 1.82               | CONAGUA (2017)   |
|                            | Tlajomulco de Zúñiga                              | Pozo JC Minán V  | 0.032         | 6.17               | CONAGUA (2017)   |
| <b>Michoacán de Ocampo</b> | La Piedad   | Laureles (Pozo Cd. Del Sol II)   | 0.035         | 11.16              | CONAGUA (2017)   |
|                            | Charcas   | Laguna Seca  | 0.096         | 5.23               | UASLP (2004-2005)  |
|                            | Salinas de Hidalgo                                | La Reforma   | 0.042         | 4.32               | UASLP (2004-2005)  |
| <b>San Luis Potosí</b>     | Santo Domingo                                     | Cabecera Municipal, Illescas, Santa Matilde y San Juan del Salado  | 0.025-0.062   | 1.82-4.81          | UASLP (2004-2005)  |
|                            | Villa de Guadalupe                                | Vallejos   | 0.061         | 3.42               | UASLP (2004-2005)  |
|                            | Villa de Ramos                                    | El Barril, El Zacatón, La Dulcita, La Hediondilla, Salitral de Carrera, Sauz de Calera y El Sauz   | 0.042-0.195   | 1.55-5.44          | UASLP (2004-2005), CONAGUA (2017)                                  |

| Estado           | Municipio                     | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>         | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año) |
|------------------|-------------------------------|--|---------------|---------------|-------------------------------|
| <b>Sonora</b>    | Caborca                       | Ejido Campodonico                        | 0.034         | 3.52          | CONAGUA (2017)                |
|                  | General Plutarco Elías Calles | Pozos: Reynoso, Quitovac y Ejido Pápagos | 0.028-0.077   | 1.49-12.27    | CONAGUA (2017)                |
|                  | Hermosillo                    | Pozos: Viveros de Cesues y 12V           | 0.048-0.050   | 2.53-3.92     | CONAGUA (2017)                |
|                  | Fresnillo                     | Rancho Grande                            | 0.032         | 2.97          | CONAGUA (2017)                |
|                  | General Pánfilo Natera        | General Pánfilo Natera                   | 0.038         | 2.48          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Zacatecas</b> | Guadalupe                     | Fracc. Ché Guevara                       | 0.068         | 1.52          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Huanusco                      | Los Arellano y Huanusco                  | 0.028-0.051   | 713-789       | CONAGUA (2017)                |
|                  | Juchipila                     | La Mezquitera                            | 0.037         | 1.83          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Luis Moya                     | Esteban S. Castorena y Luis Moya         | 0.055-0.099   | 2.65-2.70     | CONAGUA (2017)                |
|                  | Mazapil                       | Camacho 1 (San Marcos)                   | 0.179         | 6.77          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Miguel Auza                   | Juan Aldama                              | 0.098         | 2.22          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Norias de Ángeles             | Maravillas                               | 0.055         | 1.51          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Ojocaliente                   | Ojocaliente                              | 0.106         | 3.70          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Río Grande                    | El Fuerte                                | 0.094         | 2.46          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Villa de Cos                  | Estancia La Colorada                     | 0.400         | <b>21.45</b>  | CONAGUA (2017)                |
|                  | Villa González Ortega         | Villa González Ortega                    | 0.033         | 1.93          | CONAGUA (2017)                |
|                  | Zacatecas                     | Pozo 2 y 254                             | 0.030-0.038   | 1.88-3.29     | CONAGUA (2017)                |

**Nota:** <sup>1</sup> indica la Localidad o el Sitio de la toma de muestra

**Tabla 2.2.** Localidades con concentración de arsénico superiores a 0.025mg/L y concentraciones de fluoruro menores a 1.5mg/L establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994, Salud Ambiental, 2000, para agua de uso y consumo humano.

| Estado                     | Municipio          | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>  | Arsénico mg/L       | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)         |
|----------------------------|--------------------|---|---------------------|---------------|---------------------------------------|
| <b>Baja California Sur</b> | Comondú            | San Luis Gonzaga y Villa Morelos  | 0.0300              | D-ND          | NIPARAJA/EOZ (2005)                   |
|                            | La Paz             | San Antonio, Juan Domínguez Cota, Tiro Santa Cruz, El Sargento y Pozo Clave 91  | 0.030-0.167         | 0.25-0.47     | CONAGUA (2017)                        |
|                            | La Paz             | A. Bonfil, Cortq. Agraria, El Carrizal, El Estero, El Medano, El Progreso, El Rosario, El triunfo, La Palmilla, La Soledad, Las Lisas, Las Pocitas, Los Planes, Punta Coyote, Ref. Agraria 1, San Antonio, Santa Rosa, Valle la Paz, Valle Perdido y La Soledad | 0.025- <b>0.500</b> | D-ND          | NIPARAJA/EOZ (2005)                   |
|                            | Loreto             | Timbarichi  | 0.0300              | D-ND          | NIPARAJA/EOZ (2005)                   |
|                            | Los Cabos          | Boca del Salado, Boca El Álamo y Boca El Sauzoso  | 0.005-0.100         | D-ND          | NIPARAJA/EOZ (2005)                   |
|                            | Mulegé             | Playa Santispac, San Hilario, San José de Magdalena, San Miguel de Mulegé y San Ignacio   | 0.030-0.080         | D-ND          | NIPARAJA/EOZ (2005)                   |
|                            | La Paz             | Pozos 2 y 4   | 0.090-0.459         | 0.05-0.12     | CINVESTAV, IPN (2012)                 |
|                            | Aldama             | Tabalaopa-Aldama 4  | 0.0320              | 1.02          | CONAGUA (2017)                        |
|                            | Camargo            | Estación Díaz, La Enramada, Floreño, Ortegueño y El Porvenir  | 0.039-0.047         | 0.84-1.07     | CINVESTAV, IPN (2009)                 |
|                            | Casas Grandes      | Ejido Ignacio Zaragoza  | 0.032               | 0.54          | CINVESTAV, IPN (2009)                 |
| <b>Chihuahua</b>           | Chihuahua          | El Charco, San Isidro (Los Hoyos)   | 0.027               | 0.35          | CINVESTAV, IPN (2010)                 |
|                            | Coronado           | Conquista Agraria y Emiliano Zapata   | 0.032-0.045         | 0.5-1.01      | CINVESTAV, IPN (2009)                 |
|                            | Delicias           | Colonia Armendáriz  | 0.029               | 0.50          | CINVESTAV, IPN (2009)                 |
|                            | Hidalgo del Parral | Maclovio Herrera (Santa Rosa)   | 0.026               | 0.88          | CINVESTAV, IPN (2010)                 |
|                            | Jiménez            | El Águila, Torreoncitos y Jiménez Camargo 1   | 0.029-0.110         | 0.53-1.16     | CINVESTAV, IPN (2009); CONAGUA (2017) |
|                            | La Cruz            | La Cruz, Corraleño de Juárez, Estación La Cruz y Morifeño   | 0.047-0.095         | 0.35-1.08     | CINVESTAV, IPN (2009)                 |

| Estado                      | Municipio              | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>  | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)         |
|-----------------------------|------------------------|---|---------------|---------------|---------------------------------------|
| <b>Chihuahua</b>            | Meoqui                 | Meoqui-Delicias (8-B)   | 0.043         | 1.42          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Ojinaga                | Los Juncos 2  | 0.07          | s/dato        | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Rosales                | Meoqui-Delicias (M-22)  | 0.027         | 1.15          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | San Francisco de Bojja | Ojo de Agua   | 0.03          | 0.95          | CINVESTAV, IPN (2009)                 |
|                             | Saucillo               | Saucillo, Colonia Altamirano, La Cuadra, Orranteño y Colonia Vicente Guerrero   | 0.028-0.072   | 0.70-1.04     | CINVESTAV, IPN (2011); CONAGUA (2017) |
|                             | Matamoros              | Pozo Alamito  | 0.031         | 0.45          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Sierra Mojada          | Pozo Salinas del Rey Sur  | 0.079         | 0.13          | CONAGUA (2017)                        |
| <b>Coahuila de Zaragoza</b> | Torreón                | Pozos: 4074, Nuevo San Isidro, Campo de Tiro y El Canario   | 0.027-0.046   | 0.31-0.77     | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Coneto de Comonfort    | Pozo Nogales  | 0.042         | 0.77          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Cuencamé               | Pozos: Ramón Corona, Ignacio López Rayón 1 y 2, Pedricenseña 1 y 2, Velardeña, Vistahermosa, Cuencamé 1, 2 y 4, 12 de Diciembre | 0.027-0.112   | 0.27-1.24     | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Gómez Palacio          | Pozos: 32 Pancho Villa, 6 Casa de la Cultura, El Quemado, 14 San Ignacio y 5 Trujano/Urrea                                      | 0.059-0.123   | 0.55-1.12     | CONAGUA (2017)                        |
| <b>Durango</b>              | Hidalgo                | Pozo San Fermín   | 0.043         | 1.00          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Lerdo                  | Pozos: Los Sabinos, 1 y 1022 Cd. Juárez, La Torreña, 5 Rancho Mi Sueño y 7 Libres Picardías                                     | 0.042-0.136   | 0.39-1.15     | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Nuevo Ideal            | Pozo Fuente del Llano   | 0.040         | 1.23          | CONAGUA (2017)                        |
|                             | San Bernardo           | Pozos 5 de Julio y Sardinias  | 0.029-0.039   | 0.58-0.95     | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Santiago Papasquiaro   | Pozos: Herberto Castillo, 2 Los Herrera y 10 de Abril   | 0.033-0.079   | 0.79-1.38     | CONAGUA (2017)                        |
|                             | Tepehuanes             | Pozos: Presidios, Tepehuanes 1 y 3  | 0.026-0.038   | 0.68-1.35     | CONAGUA (2017)                        |

| Estado                 | Municipio                   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>                                 | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)          |
|------------------------|-----------------------------|--|---------------|---------------|--|
| <b>Guanajuato</b>      | Abasolo                     | La Canoa   | 0.056         | 0.80          | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Cuerámaro                   | Bordo Blanco 2   | 0.032         | 1.35          | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Manuel Doblado              | Jagüey de los Serranos y Ejido Dotación Puerta de Llave          | 0.026-0.335   | 0.84-1.47     | CONAGUA (2017)                         |
|                        | San Luis de la Paz          | Estación de Lourdes - San Luis de la Paz y Misión de Chichimecas | 0.025-0.034   | 1.30-1.40     | CONAGUA (2017); Caminos de Agua (2016) |
|                        | San Miguel de Allende       | Colonia San Antonio y Los Galvanes                               | 0.025         | 1.02-1.34     | Caminos de Agua (2016)                 |
|                        | Zimapan                     | Zimapan; Pozos Zimapan 1 y 2                                     | 0.046-0.358   | 0.20-0.60     | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Tlajomulco de Zúñiga        | Pozos Toluquilla 7 y Rancho Alegre                               | 0.031-0.051   | 1.00-1.33     | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Tenancingo                  | Pozo Alameda Tenancingo  | 0.086         | 0.3           | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Cuitzeo                     | Pozo San Agustín del Pulque                                      | 0.036         | 0.89          | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Acaponeta                   | Pozo Acaponeta (S. Tecuala-Novillero)                            | 0.045         | 0.93          | CONAGUA (2017)                         |
| <b>Oaxaca</b>          | Heroica Ciudad de Huajuapán | Pozo Huajuapán   | 0.025         | 0.66          | CONAGUA (2017)                         |
| <b>Oaxaca</b>          | San Pablo Villa de Mitla    | Pozo 2025-T8 SAP Unión Zapata                                    | 0.237         | 0.81          | CONAGUA (2017)                         |
| <b>San Luis Potosí</b> | Ahualulco                   | Cabeceira Municipal  | 0.033-0.039   | 0.90-0.98     | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Charcas                     | Cañada Verde   | 0.025         | 0.77          | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Guadalcázar                 | Cabeceira Municipal y Pozas de Santa Ana                         | 0.025-0.051   | 0.53-1.28     | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Mexquitic de Carmona        | Guadalupe Victoria   | 0.062         | 0.77          | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Salinas de Hidalgo          | Conejillo  | 0.025         | 1.39          | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Santo Domingo               | La Providencia y Jesús María                                     | 0.026-0.058   | 0.63-1.4      | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Villa de Guadalupe          | Jarillas   | 0.025         | 1.03          | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Villa de Ramos              | Dulce Grande, Santa Lucía y Cabeceira Municipal                  | 0.024-0.051   | 0.40-1.45     | UASLP (2004-2005)                      |
|                        | Ahome                       | San Miguel Zapotitlán y 12 Las Quintas                           | 0.029-0.089   | 0.25-0.89     | CONAGUA (2017)                         |
|                        | Mazatlán                    | Pozo CNA 013   | 0.027         | 0.26          | CONAGUA (2017)                         |
| <b>Sinaloa</b>         | Navolato                    | Pozo CNA 197 Cofradía Navolato                                   | 0.029         | 0.21          | CONAGUA (2017)                         |

| Estado                                 | Municipio                    | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>              | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año) |
|--|------------------------------|---|---------------|---------------|-------------------------------|
| <b>Sonora</b>                          | San Luis Río Colorado        | Sistema de Infiltración de Aguas Residuales 2 | 0.068         | 0.23          | CONAGUA (2017)                |
|  | Santa Ana                    | Pozo Estación Llano                           | 0.069         | 0.92          | CONAGUA (2017)                |
|  | Trincheras                   | Pozo El Callejón                              | 0.028         | 1.08          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Tabasco</b>                         | Cárdenas                     | 4-SAPAET C-11                                 | 0.031         | 0.25          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Veracruz de Ignacio de la Llave</b> | Veracruz                     | SAS (Ferrosur)                                | 0.026         | 0.37          | CONAGUA (2017)                |
|  | Concepción del Oro           | Concepción del Oro                            | 0.038         | 0.29          | CONAGUA (2017)                |
|  | El Salvador                  | El Salvador 2                                 | 0.061         | 1.14          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Zacatecas</b>                       | General Francisco R. Murguía | General Francisco R. Murguía                  | 0.091         | 1.25          | CONAGUA (2017)                |
|  | Trancoso                     | Trancoso                                      | 0.034         | 0.87          | CONAGUA (2017)                |
|  | Zacatecas                    | Francisco I. Madero                           | 0.070         | 0.77          | CONAGUA (2017)                |

**Notas:** 1 indica la Localidad o el Sitio de la toma de muestra; D-ND es dato no disponible.

**Tabla 2.3.** Localidades con concentración de fluoruro en agua subterránea superior a 1.5mg/L y concentración de arsénico menor a 0.025 mg/L establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, 2000, para agua de uso y consumo humano.

| Estado                     | Municipio                   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>   | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)         |                |
|----------------------------|-----------------------------|--|---------------|---------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>Aguascalientes</b>      | El Llano                    | Palo Alto (El Llano), Pozo 59, San Marcos, Pozo Calvillito, Fracc. Ojo Caliente 4, Fracc. Norte, Central Camionera | 0.014-0.019   | 1.61-15.3     | UASLP (2001)                          |                |
|                            | Aguascalientes              | Pozo de la Comunidad de los Durón  | <LD           | 4.70          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | El Llano                    | Pozo 2, Palo Alto  | 0.009         | 2.75          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Jesús María                 | Pozos Gracias a Dios   | <LD           | 3.45          | CONAGUA (2017)                        |                |
| <b>Baja California</b>     | Ensenada                    | Maneadero 3  | <LD           | 1.81          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Los Cabos                   | Pozo Javier Arámbaro   | <LD           | 1.73          | CONAGUA (2017)                        |                |
| <b>Baja California Sur</b> | Aldama                      | El Mimbre de Abajo, Tabaloopa-Aldama 2, Escuela José María Morelos y Centro  | 0.012-0.019   | 1.99-2.73     | CONAGUA (2017); CINVESTAV, IPN (2015) |                |
|                            | Ascensión                   | Ascensión 2  | <LD           | 2.26          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Bachiniva                   | Cuauhtémoc 2   | <LD           | 3.14          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Buenaventura                | Flores Magón-Villa Ahumada 1 y 2, y, Laguna Vieja 1 y 2  | <LD - 0.024   | 2.04-4.74     | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Casas Grandes               | Casas Grandes 1  | <LD           | 2.47          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Chihuahua                   | Caseta Ojo Laguna  | <LD           | 3.47          | CONAGUA (2017)                        |                |
| <b>Chihuahua</b>           | Delicias                    | Meoqui-Delicias (M-16)   | 0.015         | 1.63          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Guadalupe                   | Valle de Juárez 2  | <LD           | 1.94          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Nuevo Casas Grandes         | Casas Grandes 3  | <LD           | 3.27          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Ojinaga                     | Los Juncos 3   | 0.023         | 3.87          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Saucillo                    | Meoqui-Delicias (M-8)  | <LD           | 1.52          | CONAGUA (2017)                        |                |
|                            | Villa Ahumada               | Pozos 2 y 3  | D-ND          | 5.3           | Ruiz-Payan y col. (2005) <sup>3</sup> |                |
|                            | <b>Coahuila de Zaragoza</b> | Cuatro Ciénegas  | El Hundido 1  | 0.014         | 2.95                                  | CONAGUA (2017) |

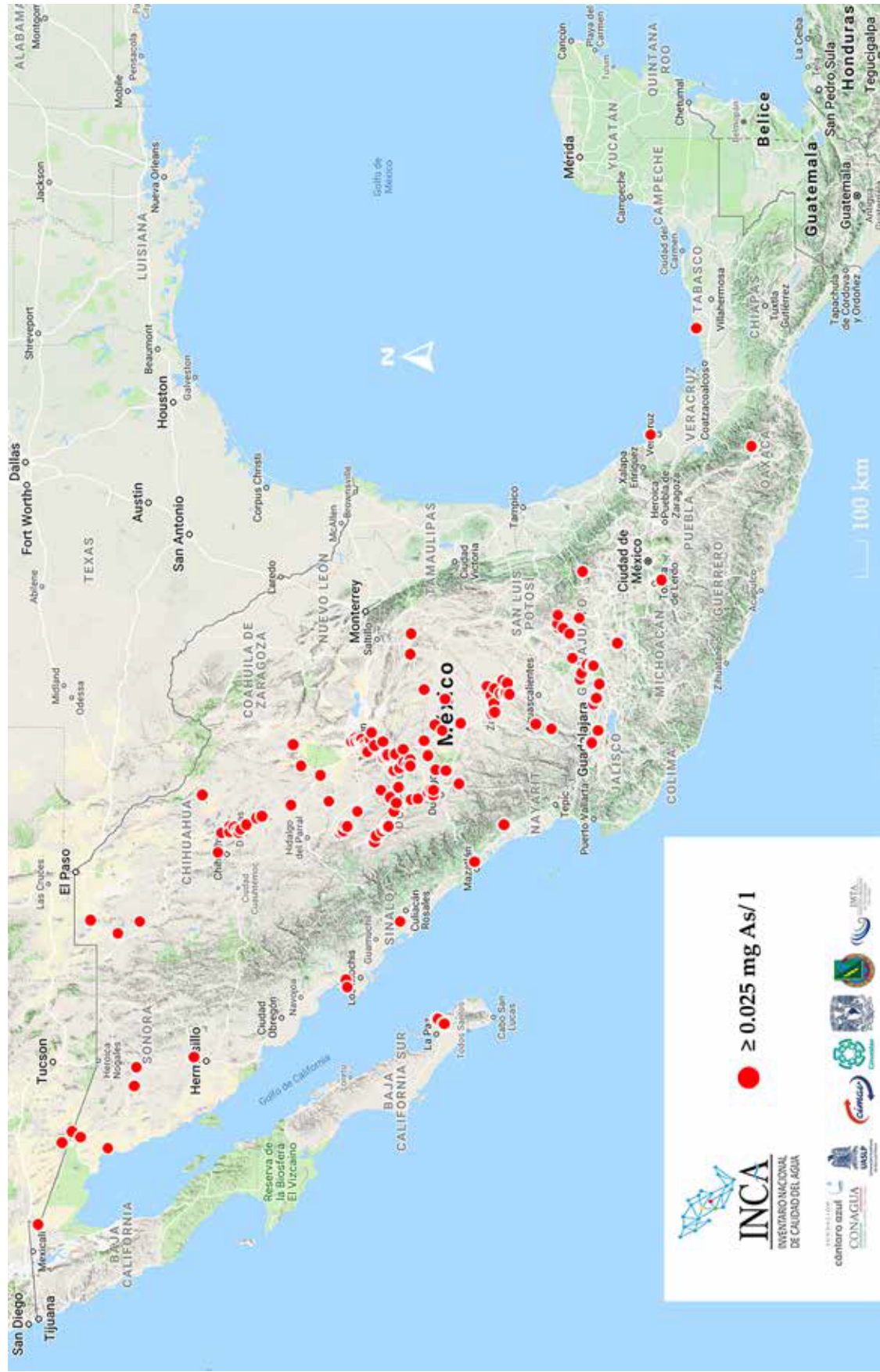
| Estado     | Municipio   | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>   | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)  |
|------------|---|--|---------------|---------------|--|
| Durango    | Durango   | Pozos 46, 65, 68, 4, 13, 5, 6, 84, 41, 1, 18, 82, 60, 27, 7, 12, 7 y 38  | <LD-0.024     | 1.71-3.49     | CONAGUA (2017); UASLP (2003)   |
|            | Guadalupe Victoria                                | Pozo Guadalupe Victoria  | 0.018         | 1.85          | CONAGUA (2017)   |
|            | Guanacevi   | Guanacevi, Mpio. M.N.  | <LD           | 3.9           | CONAGUA (2017)   |
|            | Nombre de Dios                                    | Pozo Nombre de Dios  | 0.018         | 1.58          | CONAGUA (2017)   |
|            | Pánuco de Coronado                                | Pozo Francisco I. Madero   | 0.022         | 2.7           | CONAGUA (2017)   |
|            | San Dimas   | Pozo Colinas   | 0.016         | 9.14          | CONAGUA (2017)   |
|            | San Juan del Río                                  | Pozos 1 San Lucas de Ocampo, Leona Vicario, El Ranchito, La Secundaria, Las Canchas, La Loma y José Ma. Patoni   | 0.012-0.024   | 1.56 - 12.32  | CONAGUA (2017)   |
|            | Abasolo   | Pozo 6 y 7, y Berumbó  | 0.004-0.017   | 2.99-3.92     | CONAGUA (2017); UASLP (2001)   |
|            | Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional | Manuel Antonio Vertiz Flores, La Bairranca, El Capullín, Los Claveles, Gravioto, La Colorada, Las Adjuntas del Monte, Las Yerbas, Ovejas y Soledad Nueva   | <LD-0.018     | 1.50-4.42     | CONAGUA (2017); Northern Illinois University (2013-2014); Texas A&M University (2015); Caminos de Agua (2014)  |
|            | Salamanca   | Pozos 11 y 17  | <LD           | 1.77-2.16     | UASLP (2001)   |
| Guanajuato | San Diego de la Unión                             | Ex Hacienda de Jesús, Mulatos, Pozo Ademado y terreros de la Concepción  | 0.008-0.020   | 1.80-18.20    | Northern Illinois University (2013-2014); Caminos de Agua (2014)   |
|            | San Francisco del Rincón                          | Pozos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 y 9  | 0.007-0.021   | 1.6-2.4       | UASLP (2001)   |
|            | San Luis de la Paz                                | Ejido Jofre y La Onza  | 0.004-0.012   | 1.56-3.12     | Northern Illinois University (2013); Caminos de Agua (2014, 2017)  |
|            | San Miguel de Allende                             | Pozo 2, Agustín González, Artesano de Banda, Pozo Caminos de Agua, Colonias Insurgentes, Lindavista, Obrajes, Olimpo, Providencia, Centro, San Antonio, San Rafael, pozo del Ejido de Tirado, El Nigromante, Pozo El Otomí, Fracc. Las Brisas, Guerrero, Juan González, La Aurora, La Ciénega, La Palma, La Vista, Lindero, Loma de Concinas, Loma, Los Ricos de Abajo, Los Torres, Misión/Cieneguilla, Montecillo de Nieto, San Miguel Viejo y San Luis Rey | <LD-0.024     | 1.52-6.40     | CONAGUA (2017); Northern Illinois University (2012, 2013, 2015); Caminos de Agua (2014, 2015, 2016, 2017); Texas A&M University (2016); SAPASMA (2013) |
|            | Silao de la Victoria                              | Agua Caliente, Comanjilla y La Luz   | 0.010-0.016   | 2.31-12.18    | UASLP (2001)   |

| Estado            | Municipio             | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>   | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)  |
|-------------------|-----------------------|--|---------------|---------------|--|
| <b>Hidalgo</b>    | Atotonilco El Grande  | Manantial Amajac   | <LD           | 1.62          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Tecozautila           | Manantial El Geiser  | 0.023         | 8.25          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Tezontepec de Aldama  | Manantial Tezontepec   | <LD           | 2.48          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Tula de Allende       | Manantial Damu   | <LD           | 1.63          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Acatic                | Acatic   | D-ND          | 0.2-2.7       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Encarnación de Díaz   | Encarnación de Díaz  | D-ND          | 2.5-5.9       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Lagos de Moreno       | Pozos: 1, 2, 3, 5, 6, 8, De los Muñoz, La Laguna, La Adelita, Lomas del Valles, Colinas del Valle, Buenavista, Depósitos San Miguel y El Calvario, | D-ND          | 1.10-5.32     | UASLP (2001); Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>                             |
|                   | Mexxicacán            | Mexxicacán   | D-ND          | 0.83-17.2     | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup> ; Pérez-Patiño y col. (2007) <sup>5</sup> |
|                   | Ojuelos               | Ojuelos  | D-ND          | 1.3-3.1       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | San Juan de los Lagos | San Juan de los Lagos  | D-ND          | 2.5-5.9       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
| <b>Jalisco</b>    | Teocaltiche           | Teocaltiche  | D-ND          | 3.1-17.7      | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Tepatitlán de Morelos | Tepatitlán de Morelos  | D-ND          | 0.1-14.9      | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Tlajomulco de Zúñiga  | Pozo Nicolás Jiménez Moreno  | <LD           | 2.81          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Unión de San Antonio  | Unión de San Antonio   | D-ND          | 0.6-2.2       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Valle de Guadalupe    | Valle de Guadalupe   | D-ND          | 2.5-3.9       | Hurtado y Gardea (2005) <sup>4</sup>   |
|                   | Zapopan               | Pozo San Juan de Ocotán 1  | 0.016         | 3.98          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Coyotepec             | Pueblo de Teoloyucan   | <LD           | 1.75          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Cadereyta Jiménez     | Noría Rancho Las Anacuas   | <LD           | 1.60          | CONAGUA (2017)   |
|                   | Querétaro             | Pozos: Vidriera y Michelin   | 0.006-0.017   | 1.99-4.41     | CONAGUA (2017)   |
|                   | Tolimán               | Horno de Cal   | 0.007         | 1.90          | CONAGUA (2017)   |
| <b>México</b>     |                       |  |               |               |  |
| <b>Nuevo León</b> |                       |  |               |               |  |
| <b>Querétaro</b>  |                       |  |               |               |  |

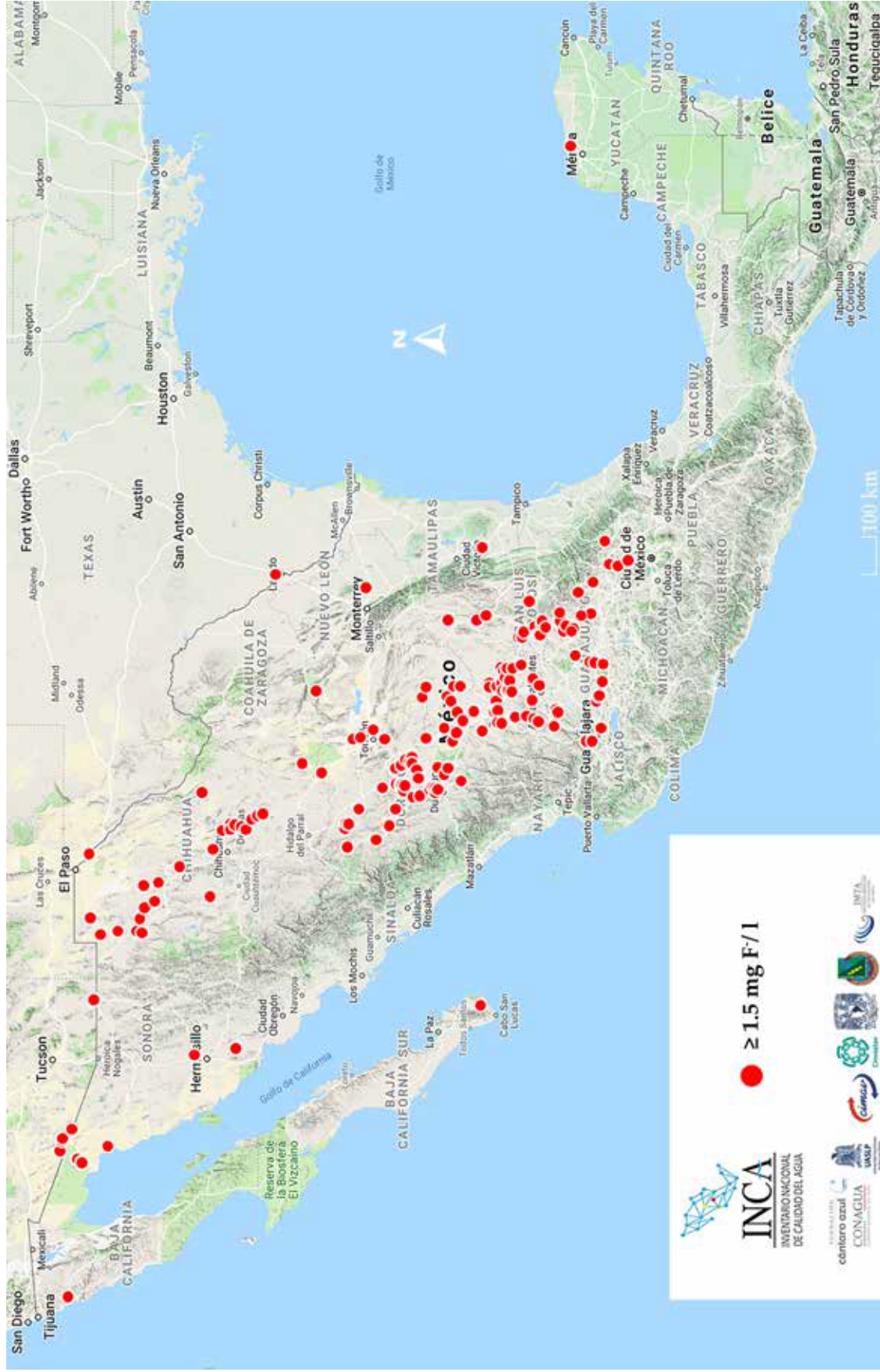
| Estado                 | Municipio            | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>  | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año)     |
|------------------------|----------------------|---|---------------|---------------|-----------------------------------|
| <b>San Luis Potosí</b> | Guadalcázar          | Norias del Conde, El Milagro, El Jilote, San Juan sin Agua y La Verdolaga   | <LD-0.024     | 1.63-3.44     | UASLP (2004-2005); CONAGUA (2017) |
|                        | Mathuala             | Los Pocitos (CNA-186)   | <LD           | 1.63          | CONAGUA (2017)                    |
|                        | Mexquitic de Carmona | La Tapona   | 0.019         | 2.26          | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Moctezuma            | Estación Moctezuma  | <LD           | 1.7           | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Rioverde             | Pozo Tecomates  | 0.019         | 1.63          | CONAGUA (2017)                    |
|                        | Salinas de Hidalgo   | Las Colonias y Cabecera Municipal   | <LD-0.022     | 1.56-1.80     | UASLP (2004-2005); CONAGUA (2017) |
|                        | San Luis Potosí      | Delegación Villa de Pozos, Pozo Muñoz y Pozo Periférico 1   | <LD-0.010     | 2.21-4.34     | CONAGUA (2017)                    |
|                        | Santa María del Río  | Santo Domingo, El Fuerte, Ojocaliente y Enramadas   | <LD-0.019     | 1.85-3.24     | UASLP (2004-2005); CONAGUA (2017) |
|                        | Santo Domingo        | Zancairón   | 0.001         | 1.89          | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Tierra Nueva         | Pozo Tierra Nueva   | <LD           | 1.58          | CONAGUA (2017)                    |
| <b>San Luis Potosí</b> | Villa de Arriaga     | Cabecera Municipal y San Francisco  | 0.004-0.015   | 2.11-4.82     | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Villa de Guadalupe   | Pozo 3 La Masita, Palo Blanco, San Francisco y Santa Teresa   | <LD-0.012     | 1.55-2.28     | UASLP (2004-2005); CONAGUA (2017) |
|                        | Villa de Ramos       | El Naranjal, Yoliati, La Herradura y La Hediondilla   | <LD-0.023     | 1.68-2.42     | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Villa de Reyes       | La Ventilla, Carranco, Gogorrón, Laguna de San Vicente, Socavón, El Calvario, Cabecera Municipal, El Rosario, Bledos, Pozos San Isidro, Balneario San Diego, pozos 504, 2 y 3, y San Francisco El Hundido | <LD-0.014     | 1.77-3.26     | UASLP (2004-2005); CONAGUA (2017) |
|                        | Villa de Zaragoza    | La Esperanza, Labor de Milpillas, Cerro Gordo, Xoconostle y Texas   | 0.005-0.014   | 1.51-2.24     | UASLP (2004-2005)                 |
|                        | Villa Juárez         | La Gavia  | 0.008         | 1.62          | UASLP (2004-2005)                 |

| Estado            | Municipio                     | Localidad y/o Sitio <sup>1</sup>                        | Arsénico mg/L | Fluoruro mg/L | Institución Responsable (año) |
|-------------------|-------------------------------|---|---------------|---------------|-------------------------------|
| <b>Sonora</b>     | Agua Prieta                   | Agua Prieta   | 0.009         | 1.98          | CONAGUA (2017)                |
|                   | General Plutarco Elías Calles | Público Urbano Sonoita y Cerro Colorado                 | <LD           | 2.91-5.08     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Guaymas                       | Pozo El Destierro                                       | 0.01          | 1.78          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Tamaulipas</b> | Puerto Peñasco                | Campo J.F. Kennedy y Pozos Omapas 2, 5 y 6              | <LD-0.022     | 3.26-4.88     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Nuevo Laredo                  | Hielo S. Laredo   | <LD           | 1.55-1.72     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Xicoténcatl                   | Pozo Rancho Los Naranjos                                | <LD           | 1.89          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Apulco                        | Nochistlán  | <LD           | 4.89          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Cañitas de Felipe Pescador    | Cañitas de Felipe Pescador                              | 0.017         | 2.66          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Fresnillo                     | Pozos Santa Bárbara y 581 Peardillo                     | 0.011-0.018   | 1.58-1.78     | CONAGUA (2017)                |
|                   | General Pánfilo Natera        | Santa Elena   | 0.022         | 1.68          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Jerez                         | Ermitea de Guadalupe y Pozo 7 Jerez                     | D-ND          | 3.7           | CONAGUA (2017)                |
|                   | Mazapil                       | Camacho 2 (Estación Opal CNA 006)                       | 0.020         | 1.98          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Nochistán de Mejía            | Apulco  | 0.013         | 5.31          | CONAGUA (2017)                |
| <b>Zacatecas</b>  | Pinos                         | El Obraje   | 0.013         | 2.05          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Sain Alto                     | Sain Alto y Felipe Carrillo Puerto (El Arenal)          | 0.012-0.016   | 3.84-4.32     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Tabasco                       | Pozo 6  | 0.011         | 5.25          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Villa de Cos                  | Guadalupe de las Corrientes, Sierra Vieja y El Capirote | 0.009-0.016   | 2.11-2.93     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Villa Hidalgo                 | Villa Hidalgo, El Sotolillo                             | 0.022         | 2.16-2.44     | CONAGUA (2017)                |
| <b>Yucatán</b>    | Villanueva                    | Tenango y San Miguel                                    | <LD-0.011     | 2.70-3.22     | CONAGUA (2017)                |
|                   | Zacatecas                     | Pozo 1401 Granja María Teresa                           | 0.022         | 1.68          | CONAGUA (2017)                |
|                   | Yaxkukul                      | Baca  | <LD           | 1.65          | CONAGUA (2017)                |

**Notas:** 1 indica la Localidad o el Sitio de la toma de muestra; D-ND es dato no disponible; <LD indica valor inferior al límite de detección de 0.001mg/L para arsénico.



**Figura 2.7.** Distribución de sitios en el país pertenecientes a la Red Nacional de Monitoreo de agua subterránea administrada por CONAGUA en donde la concentración total de arsénico disuelto es mayor a 0.025 mg/L, el valor máximo establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, 2000, para agua de uso y consumo humano. Los datos que se representan corresponden a 2017.



**Figura 2.8.** Distribución de sitios en el país pertenecientes a la Red Nacional de Monitoreo de agua subterránea administrada por CONAGUA en donde la concentración de fluoruro es mayor a 1.50 mg/L, el valor máximo establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, 2000, para agua de uso y consumo humano. Los datos que se representan corresponden a 2017.

### Referencias

- <sup>1</sup> CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2017. Comisión Nacional del Agua, México. Recuperado el 27 de Julio de 2018 [[http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)]
- <sup>2</sup> ANEAS. El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas. R. Olivares, R. Sandoval, Coordinadores. 348p (2008).
- <sup>3</sup> Ruiz-Payan A, Ortíz M, Duarte-Gardea M. Determination of fluoride in drinking water and in urine of adolescents living in three counties in Northern Chihuahua Mexico using a fluoride ion selective electrode. *Microchemical Journal*, 81, pp 19-22 (2005).
- <sup>4</sup> Hurtado-Jiménez R, Gardea-Torresdey J. Estimación de la exposición a fluoruros en Los Altos de Jalisco, México. *Salud Pública de México*, 47(1), pp. 58-63 (2005).
- <sup>5</sup> Pérez-Patiño TJ, Scherman Leaña RL, Hernández Gutiérrez RJ, Rizo Curiel G, Hernández Guerrero MP. Fluorosis dental en niños y flúor en el agua de consumo humano. Mexticacán, Jalisco, México. *Medigraphic Artemisa en Línea, Investigación en Salud*, IX (3), pp. 214-219 (2007).

## CAPÍTULO 3. IMPACTO EN LA SALUD PÚBLICA

### EFFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A ARSÉNICO

María Eugenia Gonsebatt y Luz María Del Razo

Desde la antigüedad los alquimistas y envenenadores conocían los efectos tóxicos del arsénico, aunque se desconocía el mecanismo de cómo causaba daño. Ahora se sabe que a concentraciones muy elevadas de arsénico se puede inhibir la actividad de diversas enzimas que participan en diversos procesos importantes para la vida.

Antes del descubrimiento de los antibióticos el arsénico se usó para combatir la psoriasis, sífilis y el asma bronquial o como tónico para la salud, porque hacía ganar peso. También a principios del siglo pasado aparecieron los primeros estudios que mostraban efectos en la salud de las personas que vivían en zonas en donde se bebía agua de pozo, con elevadas concentraciones de arsénico. Debido al elevado número de personas que toman agua con arsénico en el mundo y a las enfermedades que manifiestan y que se parecen a las que desarrollaron los pacientes tratados con arsénico, se ha podido demostrar claramente que la exposición a concentraciones altas de arsénico es muy perjudicial para la salud.

Generalmente, estamos expuestos a concentraciones traza o muy bajas de arsénico ya que el arsénico se encuentra presente ubicuamente en el ambiente, por ejemplo a través de las emisiones volcánicas. Sin embargo, es de preocupación cuando nos exponemos al arsénico en su forma inorgánica a través del aire contaminado por polvo con alto contenido de arsénico, como los desechos mineros o por trabajar en fundidoras que procesan minerales con alto contenido de arsénico, etc. Sin embargo, la fuente principal de exposición es a través del agua de bebida. Es por ello, que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el agua que bebemos no tenga más de 10 partes por billón (ppb) de arsénico o 10 microgramos/L o sea 0.010 mg/L, o que el aire no contenga más de 0.010 mg/metro cúbico. Para los alimentos se recomienda que no se ingiera más de 0.015 mg de arsénico/Kg de peso, por semana<sup>1</sup>.

Sin embargo, los alimentos cultivados en zonas en donde el agua contiene mucho arsénico también van a contenerlo como se ha visto en el caso del arroz y los frijoles cocidos en agua con altas concentraciones de arsénico. En la carne de pollo y de pavo también podemos encontrar arsénico cuando se usan rosorsaxona y nitarsona respectivamente como aditivos para su engorda, no obstante, no se ha relacionado que el uso de estos aditivos arsenicales causen efectos dañinos a la salud.

Por otra parte, es muy importante diferenciar el ingreso de arsénico a través de la dieta con alimentos de origen marino que contienen concentraciones muy altas de arsénico en forma orgánica, no obstante, el tipo de arsénico de los alimentos provenientes del mar no es considerado perjudicial para la salud<sup>2</sup>.

La Comisión Nacional del Agua evalúa periódicamente el contenido de arsénico en el agua de la mayoría de los pozos de agua que sirven para proveer de agua potable a la población. Los resultados de estos monitoreos, junto con los evaluados por diversas asociaciones civiles y académicas están integradas en el Inventario Nacional de Calidad de Agua (INCA) informado en el capítulo 2.1 del

presente libro. Sin embargo, muchas personas excavan sus propios pozos sin registrarlos ni revisar la concentración de arsénico que contienen<sup>2</sup>. La Norma Oficial Mexicana para el contenido de arsénico en el agua subterránea es de 0.025 mg/L y para agua embotellada es de 0.010 mg/L.

### ¿Cómo y porqué el arsénico afecta nuestra salud?

La presencia de arsénico en la orina o en el cabello y las uñas indica que estamos expuestos a este elemento, a través de los alimentos, el aire, el polvo o el agua. También se puede encontrar arsénico en la sangre, el plasma y la saliva, sin embargo, su presencia es mucho menor cuando se evalúa comparativamente con las muestras de orina, o cabello y/o uñas, por lo que generalmente se evalúa el riesgo a la exposición a arsénico través de la orina, que en el caso de los niños no debería ser mayor a 15 ppb<sup>4</sup> (0.015 mg/L), y en los adultos no mayor a 35 ppb. Se recomienda no haber comido pescados o mariscos cuatro días antes de la evaluación a la exposición a arsénico en el organismo, para evitar la sobre evaluación de la exposición al metaloide. Es común que la evaluación de la concentración de arsénico en la orina, también se reporte ajustada por la concentración de creatinina en orina, como procedimiento para corregir la posible dilución de la muestra de orina. Aunque la evaluación de la densidad o gravedad específica de la orina es el método más recomendado para realizar el ajuste de la concentración de arsénico en la orina. Cuando se considere el cabello o las uñas como medio para evaluar la exposición, las muestras no deberían contener concentraciones mayores a 1 mg de arsénico por Kg de muestra<sup>2</sup>.

Una vez que hemos ingerido arsénico, este es absorbido en el intestino y se distribuye por la sangre a todos los órganos incluyendo a nuestro cerebro. El arsénico atraviesa la placenta y llega al feto a través de la sangre. Se ha encontrado arsénico en la sangre de cordón umbilical y en la orina y uñas de los recién nacidos<sup>2</sup>, es decir que la exposición de los niños, puede comenzar en el útero materno. Si la cantidad de arsénico que entra a nuestro cuerpo es pequeña se elimina rápidamente en pocos días a través de la orina. Pero si ingerimos una cantidad mayor puede acumularse en nuestras células y como es muy afín a grupos tioles, se une a ellos. Las proteínas tienen muchos grupos tioles, en especial proteínas que son muy abundantes en el pelo, la piel, las uñas como las queratinas. Las lesiones en piel son los signos más representativos de la exposición crónica a concentraciones altas de arsénico. Los efectos perjudiciales a la salud se han documentado tanto en niños como en los adultos.

### Efectos a la salud en adultos

Cuando se ingieren concentraciones altas de arsénico durante largos periodos de tiempo (años), las personas presentan cambios de color en la piel, decoloración o manchas café con leche principalmente en el dorso y la espalda (Imagen 3.1), lesiones premalignas (Imagen 3.2) y/o desarrollo de callosidades (hiperqueratosis) en las palmas de las manos o de los pies (Imágenes 3.3).



**Imagen 3.1.** Espalda donde se muestran manchas en forma de gota de lluvia de color claro y color oscuro.



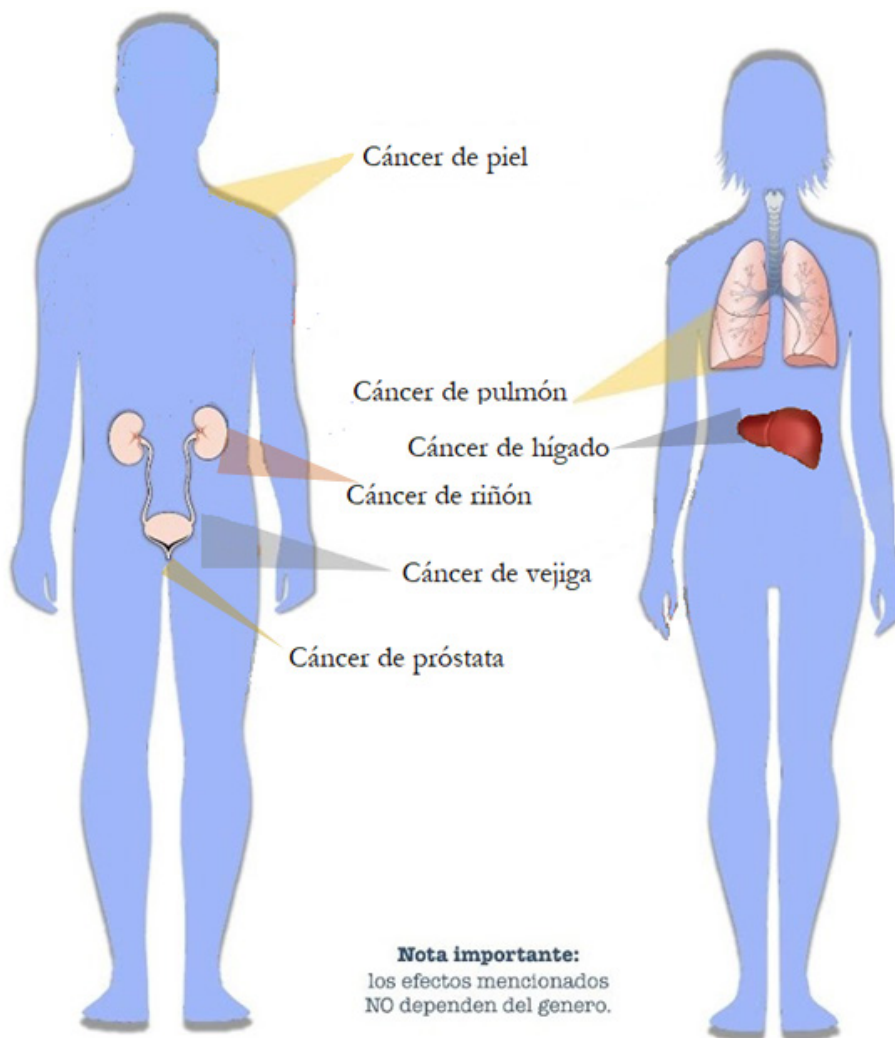
**Imagen 3.2.** Lesión en la frente de una mujer de 22 años.



**Imágenes 3.3.** En el panel izquierdo se muestra la hiperqueratosis en la palma de la mano, en el panel derecho la hiperqueratosis en las plantas de los pies.

Las lesiones en la piel que algunas veces se transforman en lesiones pre-carcinogénicas generalmente se observan en la población adulta, aunque también ha sido documentada en niños de 11-13 años expuestos a muy altas concentraciones de arsénico, en Zimapán, Hidalgo<sup>5</sup>.

La exposición a concentraciones elevadas de arsénico durante largo tiempo causa cáncer en diversos órganos y tejidos, principalmente en la piel, vejiga, hígado, pulmón y riñón, aunque también se ha relacionado con cáncer de mama (Figura 3.1). Sin embargo, la falta de registros de cáncer en las regiones con mayor exposición no permite conocer si este padecimiento es más elevado en las poblaciones con arsenicismo<sup>6</sup>.



**Figura 3.1.** La exposición a arsénico se relaciona con cáncer en diversos órganos y sistemas

La información acerca de la toxicidad del arsénico y los efectos en la salud se encuentra disponible en la página: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts2.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts2.html)<sup>2</sup>, en donde se presentan los resultados de los trabajos realizados en distintas poblaciones en el mundo y en la población mexicana.

La exposición a arsénico afecta a varios órganos y sistemas (Figura 3.2); además del daño genético, se conocen las alteraciones cardiovasculares relacionadas con hipertensión arterial, la enfermedad cardíaca isquémica, la aterosclerosis y enfermedades vasculares como los problemas circulatorios principalmente en las piernas, lo que se conoce como enfermedad del pie negro.

A nivel del sistema nervioso se conocen las neuropatías centrales y periféricas relacionadas con pérdida de sensibilidad en extremidades, y enfermedades neurodegenerativas.

## Efectos adversos en la salud por exposición a arsénico

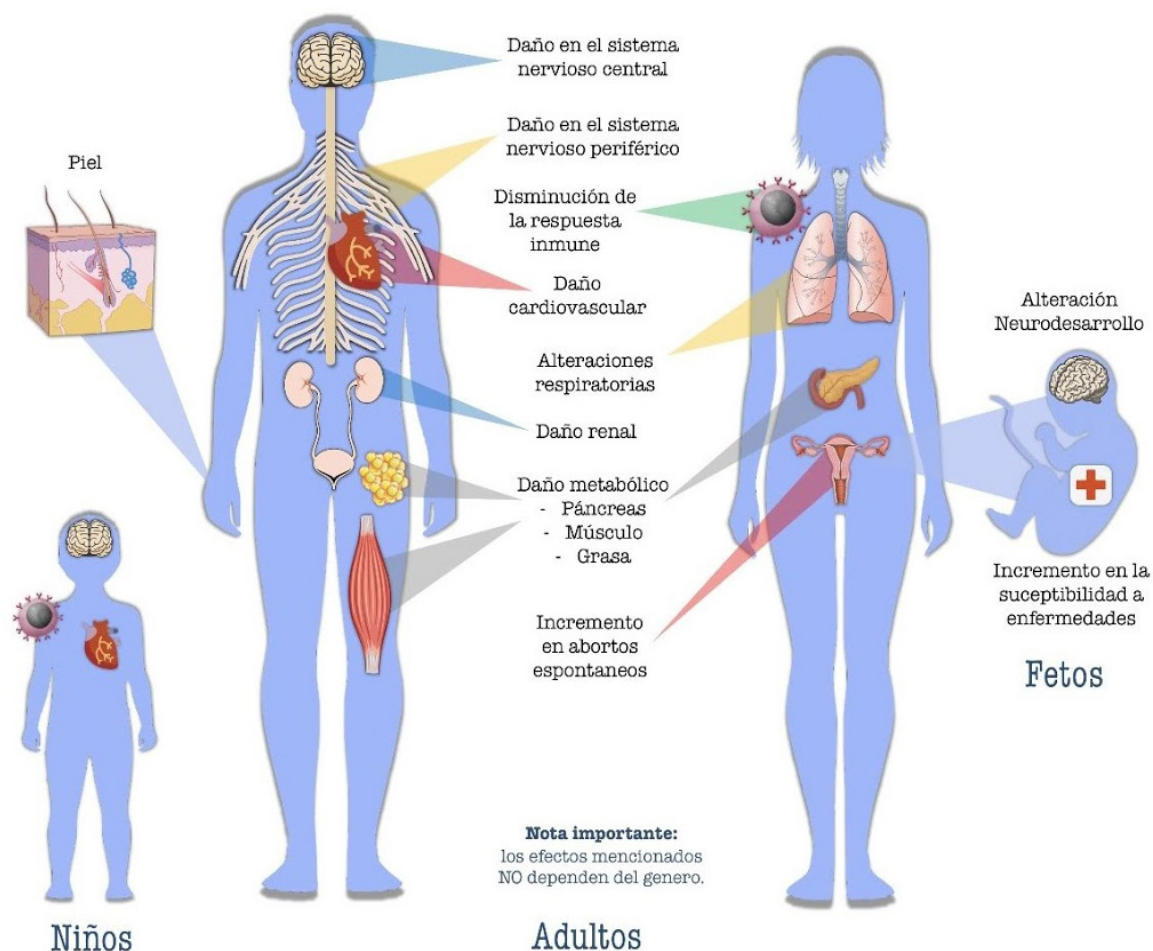


Figura 3.2. Efectos de la exposición a arsénico en niños y adultos.

La respuesta del sistema inmune también es afectada por la exposición al arsénico, donde existe inmunosupresión con aumento de alergias y de enfermedades oportunistas como el aumento de infecciones bacterianas y virulentas. También existen evidencias de la disminución de la función pulmonar. Por otra parte, las enfermedades metabólicas como diabetes mellitus y síndrome cardio-metabólico se relacionan a la exposición crónica al arsénico. También se han informado de alteraciones a nivel reproductivo donde se destaca el aumento de abortos espontáneos en casos de exposición alta al arsénico.

## Efectos a la salud en niños

Si bien la población en general es susceptible a los efectos de una sobreexposición al arsénico, son los niños quienes representan la población más sensible y vulnerable debido a que su consumo de agua es mayor, en relación a su peso; algunos órganos/sistemas blanco de la acción dañina del arsénico se encuentran en desarrollo y aún son inmaduros; poseen una esperanza de vida más larga, por lo tanto, tienen más tiempo para estar expuestos y así desarrollar enfermedades con un largo periodo de latencia, además que los patrones de conducta de los niños los pone en mayor contacto con los peligros ambientales.

El desarrollo del feto y la calidad de vida durante la niñez, puede estar impactada por la exposición al arsénico a causa de las alteraciones del sistema nervioso central, comprometiendo la capacidad intelectual y el comportamiento del infante<sup>4</sup>, por la disminución de las habilidades cognitivas aumentando las dificultades escolares, que le podrán impedir el acceso a empleos mejor remunerados.

También se ha informado en niños expuestos a concentraciones altas de arsénico, la disminución de la respuesta inmune<sup>5</sup>, daño genético, disminución de la función pulmonar, y de la función renal<sup>7</sup>, inflamación crónica y mayor riesgo a enfermedades cardíacas como aterogénesis, hipertensión arterial, hipertrofia cardíaca y disfunción cardíaca<sup>4</sup>.

Existe evidencia que sugiere que si durante el embarazo, el feto se expone a arsénico, existe una programación fetal que es mediada por cambios en la expresión de genes, en los cuales están involucrados los mecanismos epigenéticos como la metilación de las regiones promotoras de los genes que pueden aumentar la susceptibilidad a las enfermedades tanto en la niñez como en la vida adulta<sup>8</sup>. Las mujeres embarazadas en estos sitios de riesgo deben de ser protegidas de la exposición a arsénico.

Los efectos en la salud demostrados en adultos y niños mexicanos se parecen a los reportados en casos similares en otras partes del mundo, es decir, no hay duda que el arsénico a dosis elevadas causa efectos a la salud. Para protegerla, o disminuir la incidencia de enfermedades que disminuyen la calidad de vida de los habitantes de estas regiones es necesario no solamente cumplir la normatividad mexicana en el agua potable, sino también modificar la legislación para disminuirla a 0.010 mg/L, que es el nivel recomendado por la OMS y utilizado por la mayoría de los países en el mundo.

## Referencias

- <sup>1</sup> [http://www.fao.org/tempref/codex/Meetings/CCCC/cccf5/cf05\\_10s.pdf](http://www.fao.org/tempref/codex/Meetings/CCCC/cccf5/cf05_10s.pdf)
- <sup>2</sup> [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts2.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts2.html)
- <sup>3</sup> [http://www.ianas.org/water/book/diagnostico\\_del\\_agua\\_en\\_las\\_americanas.pdf](http://www.ianas.org/water/book/diagnostico_del_agua_en_las_americanas.pdf)
- <sup>4</sup> Limón-Pacheco JH, Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Sánchez-Retana IM, Gonsebatt ME, Del Razo LM. Potential Co-exposure to arsenic and fluoride and biomonitoring equivalents for Mexican children. *Ann. Glob. Health* 84, 257-273 (2018).
- <sup>5</sup> Soto-Peña GA, Luna AL, Acosta-Saavedra L, Conde P, López-Carrillo L, Cebrián ME, Bastida M, Calderón-Aranda ES, Vega L. Assessment of lymphocyte subpopulations and cytokine secretion in children exposed to arsenic. *FASEB J.* 20:779-781 (2006).
- <sup>6</sup> Cebrián ME, Albores A, Aguilar M, Blakely E. Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico, *Hum. Toxicol.* 2, 121-133. (1983).
- <sup>7</sup> Cárdenas-González M, Osorio-Yáñez C, Gaspar-Ramírez O, Pavković M, Ochoa-Martínez, A., López-Ventura D, Medeiros M, Barbier OC, Pérez-Maldonado IN, Sabbisetti VS, Bonventre JV, Vaidya VS. Environmental Exposure to Arsenic and Chromium in Children is Associated with Kidney Injury Molecule-1. *Environ Res.* 150, 653–662 (2016).
- <sup>8</sup> Laine JE, Bailey KA, Olshan AF, Smeester L, Drobná Z, Stýblo M, Douillet C, García-Vargas G, Rubio-Andrade M, Pathmasiri W, McRitchie S, Sumner SJ, Fry RC. Neonatal Metabolomic Profiles Related to Prenatal Arsenic. *Exposure. Environ Sci Technol.* 51:625-633 (2017).

## EFFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A FLUORURO

Mónica I. Jiménez Córdova, Mariana Cárdenas  
González y Olivier C. Barbier

El fluoruro es el treceavo elemento más abundante en la corteza terrestre y se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente (aire, agua y suelo). Desde la primera mitad del siglo XX, se han descrito las múltiples implicaciones del fluoruro en la salud humana y desde entonces ha sido ampliamente reconocido tanto por su efecto cariostático (anti-caries) como por sus efectos adversos a la salud. Las investigaciones lideradas por H. Trendley Dean en Estados Unidos durante los años 30's<sup>1</sup> demostraron que el consumo de agua con bajos niveles de fluoruro (1 mg/L) se relacionaba con una disminución en la prevalencia de caries dental. Este hallazgo llevó en años posteriores a la consideración del fluoruro como un importante agente cariostático, promoviendo la implementación de medidas para el consumo de agua y alimentos (sal y leche) adicionados con fluoruro, así como el uso de productos dentales con fluoruro para prevenir el desarrollo de caries dental en la población.

Los seres humanos podemos estar expuestos a fluoruro a través de varias fuentes como el agua de bebida, la sal de mesa adicionada con fluoruro, las emisiones volcánicas, los productos dentales, algunas actividades industriales (aluminio y carbón), el uso de plaguicidas como la criolita y el consumo de algunos alimentos y bebidas como vinos, té, leche, carnes, jugos, refrescos y otras bebidas embotelladas. Sin embargo, el agua de bebida es considerada la principal fuente de exposición a fluoruro, ya que puede contribuir hasta en un 80 por ciento al total de fluoruro consumido diariamente, sobretodo en aquellos lugares donde el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento<sup>2</sup>. La Organización Mundial de la Salud ha establecido como límite máximo permisible la concentración de 1.5 mg de fluoruro por litro de agua, con la finalidad de evitar que se presenten efectos adversos a la salud por el consumo excesivo de fluoruro. No obstante, en varias regiones del mundo, el agua para consumo humano sigue presentando niveles superiores a este límite, lo que constituye un riesgo a la salud para la población.

Una vez que el fluoruro es ingerido, se absorbe en el estómago y llega rápidamente a varios órganos como hígado, riñón, corazón, bazo, tiroides y cerebro donde puede ejercer sus efectos tóxicos. Así mismo puede atravesar la barrera placentaria y llegar al feto a través del torrente sanguíneo y afectar su desarrollo. Hasta un 80 por ciento de fluoruro ingerido diariamente se acumula en los dientes y huesos donde, dependiendo del recambio óseo, puede llegar a permanecer por varios años; cuando la acumulación de fluoruro en estos tejidos es excesiva ocasiona el desarrollo de fluorosis dental y fluorosis esquelética, los cuales son los efectos mayormente asociados con el consumo excesivo de fluoruro. Finalmente, el fluoruro es removido de la sangre por el riñón y eliminado a través de la orina<sup>3</sup>.

Actualmente existe una creciente preocupación sobre los efectos adversos que puede ocasionar el consumo de fluoruro de manera crónica, ya que varias investigaciones muestran que el fluoruro puede alterar el funcionamiento adecuado de diversos tejidos y órganos mediante una gran variedad de mecanismos moleculares. Los efectos adversos relacionados con la exposición a fluoruro han sido reportados dentro de un amplio intervalo de concentraciones y en varias etapas del desarrollo humano (Figura 3.3). Entre los efectos adversos del fluoruro destacan la fluorosis dental y la fluorosis esquelética, alteraciones endócrinas, disfunción cognitiva, daño renal, alteraciones cardiovasculares y afectaciones del sistema inmune. Aunque la mayoría de estas alteraciones han sido identificadas tanto en adultos como en niños, son estos últimos quienes presentan una mayor susceptibilidad a desarrollar los efectos adversos y en quienes se han centrado una gran parte de las investigaciones.

## Efectos adversos por exposición a fluoruro en humanos

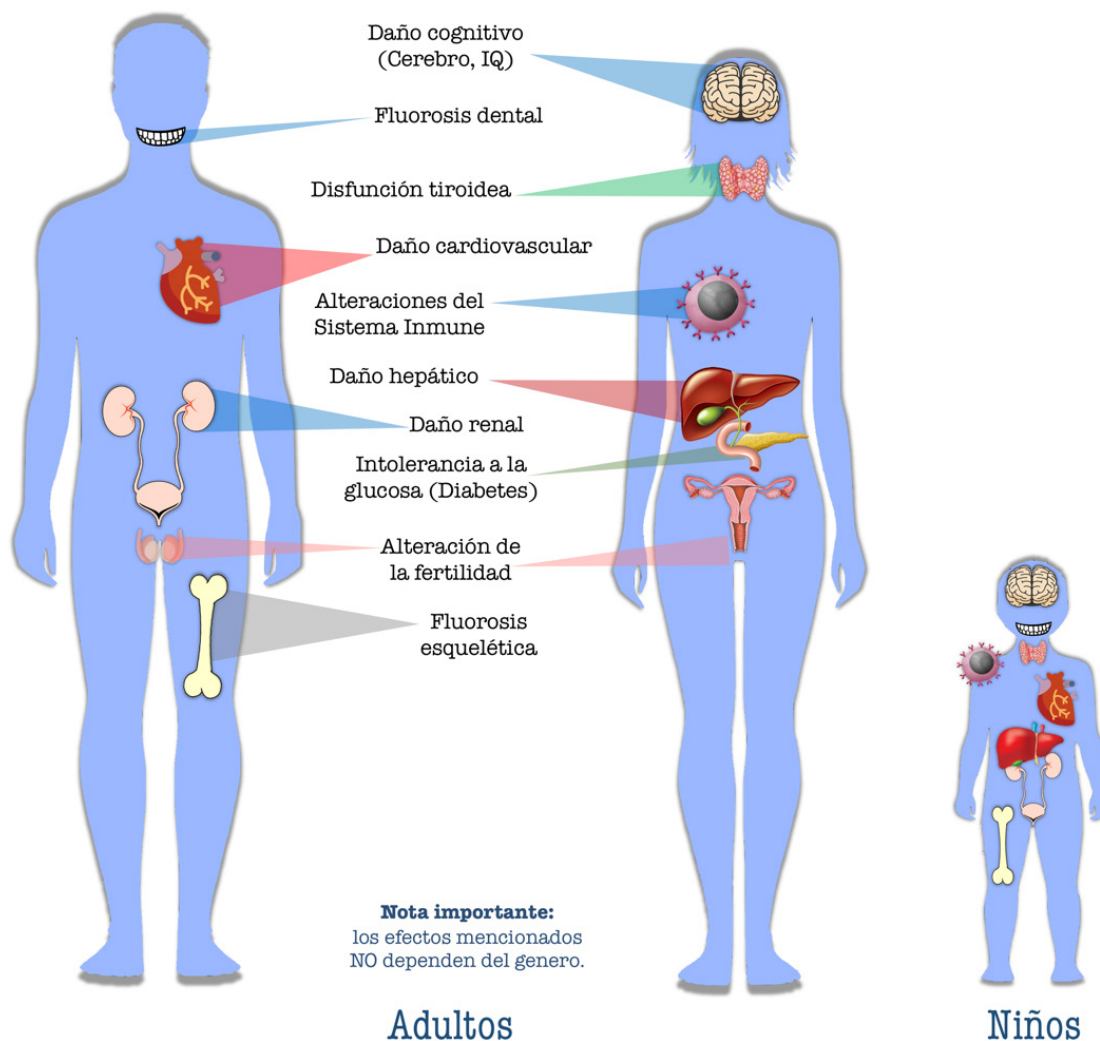


Figura 3.3: Efectos adversos del fluoruro

### Efectos a la salud en niños

El consumo excesivo de fluoruro es el responsable del desarrollo de fluorosis dental y fluorosis esquelética, las cuales son, sin duda, los efectos adversos más reconocidos del fluoruro. La fluorosis dental (Imagen 3.4) es una condición caracterizada por la presencia de un esmalte dental opaco o café, poroso y de menor dureza debido a una hipo-mineralización del esmalte por la ingestión excesiva de fluoruro durante la etapa de formación y maduración dental (etapa intrauterina y primeros 6 años)<sup>3</sup>. Mientras que la fluorosis esquelética es una enfermedad que se caracteriza por una mayor fragilidad en los huesos, como consecuencia de alteraciones en el recambio óseo, lo que genera problemas de osteosclerosis, osteoporosis y cambios articulares degenerativos. Existe una clara relación entre la concentración de fluoruro en el agua de bebida y el riesgo de padecer fluorosis dental y fluorosis esquelética. De manera general, el consumo de agua con concentraciones cercanas a 2 y 4 mg de fluoruro por litro se relaciona con un mayor riesgo de padecer fluorosis dental y fluorosis esquelética, respectivamente. Actualmente, estas enfermedades representan un problema de salud pública en

aproximadamente 24 países en todo el mundo, entre ellos México; y aunque la prevalencia global de estos padecimientos no es del todo clara, se estima que millones de personas en todo el mundo, en especial quienes residen en países con fluorosis endémica (zonas con altos niveles de fluoruro en agua), padecen estas alteraciones.



Imagen 3.4. Persona con fluorosis dental

Por otro lado, el fluoruro también tiene la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y afectar el correcto desarrollo y funcionamiento cerebral. Aunque se sabe que el fluoruro puede afectar el cerebro adulto, el mayor efecto neurotóxico se observa durante la etapa de desarrollo cerebral, la cual corresponde a la etapa intrauterina y la infancia. El fluoruro puede acumularse y afectar la función del hipocampo, una de las estructuras asociadas con el aprendizaje y memoria. La relación entre el consumo de fluoruro y la reducción de la capacidad intelectual ha sido reportada en niños de varios países como China, Irán, India y México<sup>2</sup>. Estas investigaciones identifican una disminución importante del cociente intelectual (CI) y un menor desarrollo mental desde los primeros años de vida de los niños expuestos desde la etapa prenatal<sup>5</sup>. Estas alteraciones cognitivas disminuyen la calidad de vida y afectan el desempeño académico y sano desarrollo de los niños, lo que trae graves consecuencias tanto para ellos como para la sociedad (menor capacidad de integración, empleos sin calificación, violencia, etc.).

Hasta hace algunos años, la información epidemiológica que apoyara el efecto tóxico del fluoruro a nivel renal era casi inexistente. Sin embargo, algunas investigaciones demuestran la existencia de un vínculo entre la exposición a fluoruro y la ligera reducción de la tasa de filtración glomerular en adolescentes<sup>6</sup>, así como un daño renal en niños que consumen agua con concentraciones de fluoruro mayores a 2 mg/L<sup>7</sup>. Así mismo, se han identificado alteraciones en la conducción cardíaca, una disminución de los niveles séricos de calcio y un incremento en los de sodio, lo que podría incrementar el riesgo de arritmias cardíacas en los niños expuestos.

Otro de los órganos afectados por el consumo excesivo de fluoruro es la glándula tiroides, la cual se encarga de la producción y secreción de las hormonas tiroideas tiroxina (T4) y triyodotironina (T3), responsables de regular el metabolismo y el desarrollo del cuerpo humano. La mayoría de los estudios relacionan el consumo de fluoruro con un estado de hipotiroidismo, pues encuentran una disminución en los niveles circulantes de hormonas tiroideas T3 y T4, así como alteraciones en la secreción de la hormona estimulante de la tiroides (TSH)<sup>6</sup>, la cual regula la producción y secreción de las hormonas tiroideas. Aunque de manera general el agua con concentraciones altas de fluoruro (>

1.5 mg/L) es la que más se relaciona con disfunción tiroidea, en poblaciones con un consumo deficiente de yodo las concentraciones bajas de fluoruro también pueden afectar la tiroides. Por otra parte, el fluoruro también se ha relacionado con un incremento en los niveles de calcitonina y la hormona paratiroidea (PTH), las cuales participan en la regulación del calcio, lo que promueve la depleción de calcio de sus depósitos óseos favoreciendo su desbalance en el organismo.

En algunas regiones el consumo de fluoruro se ha relacionado con alteraciones en células del sistema inmune, lo que puede incrementar el riesgo de infecciones, enfermedades autoinmunes y el desarrollo de cáncer<sup>7</sup>. No obstante es importante señalar que la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (IARC) ha concluido que hasta el momento no hay información suficiente para determinar si el fluoruro es o no un carcinógeno. Así mismo, algunas investigaciones señalan el posible efecto del fluoruro a nivel hepático<sup>7</sup>. Sin embargo, se necesita un mayor número de estudios para aclarar su participación en estos eventos.

### Efectos a la salud en adultos

Aunque varios de los efectos mencionados anteriormente también han sido observados en adultos, la presencia de efectos relacionados con enfermedades crónicas como la enfermedad cardiovascular es reportado con mayor frecuencia en adultos que en niños. Se sabe que además de los factores de riesgo ya conocidos (edad, obesidad, diabetes, antecedentes familiares, etc.), el consumo de fluoruro se ha relacionado con la alteración de algunos parámetros de función cardiovascular y con un mayor riesgo de aterosclerosis e hipertensión en países con problemas de fluorosis endémica como Turquía y China<sup>9,10</sup>. El efecto cardiovascular del consumo crónico de fluoruro ha sido recientemente estudiado y aunque aún se desconocen los mecanismos exactos por los cuales el fluoruro puede causar un daño a nivel cardiovascular, algunas investigaciones sugieren que el fluoruro es capaz de generar un desbalance entre oxidantes y antioxidantes, promover un estadio inflamatorio y modificar el balance de calcio, el cual es fundamental para la función cardiovascular.

Recientemente, también se reportó un incremento de marcadores de daño renal temprano en adultos de la zona norte de México<sup>11</sup>. Si bien el incremento de estos marcadores no indica necesariamente el padecimiento de una enfermedad renal, refleja la presencia de un daño en el riñón, el cual puede incrementar la susceptibilidad de desarrollar una enfermedad renal en el futuro. Incluso, en países como Sri-Lanka, la ingestión de fluoruro a través del agua de bebida ha sido sugerida como una posible explicación a la alta prevalencia de la enfermedad renal crónica de etiología desconocida, la cual representa un problema importante de salud pública en esa región.

En algunas zonas con altas concentraciones de fluoruro en el agua se ha documentado una mayor prevalencia de bocio (crecimiento anormal de la glándula tiroides); así como alteraciones en los niveles de hormonas reproductivas en hombres, lo que puede tener un efecto negativo en la fertilidad. Por otra parte, algunas investigaciones muestran que la exposición al fluoruro puede modificar el metabolismo de la glucosa en adultos residentes de zonas con fluorosis endémica<sup>2</sup>. Sin embargo, la información disponible no permite concluir todavía si el fluoruro es un factor de riesgo para la diabetes. Algunos de los efectos tóxicos antes mencionados cuentan con limitada información en poblaciones humanas, no obstante, es importante tomar en cuenta que la ausencia de evidencia no significa que no puedan presentarse efectos adversos, y solo indica la necesidad de contar con más estudios que permitan conocer mejor los efectos del fluoruro en la salud humana.

## Factores de riesgo en la población

Existen algunos factores que pueden favorecer la susceptibilidad de padecer los efectos tóxicos del fluoruro. Algunos de los cuales, pueden modificarse y deben ser tomados en cuenta para identificar grupos de riesgo. Por ejemplo, las deficiencias nutricionales, en especial de calcio, favorecen la absorción del fluoruro en el estómago y por lo tanto incrementan el riesgo de presentar efectos adversos. Así mismo, deficiencias en yodo o selenio pueden favorecer el efecto tóxico del fluoruro sobre la tiroides. Por otro lado, dado de que el fluoruro es eliminado principalmente a través de la orina, las personas con insuficiencia renal o en hemodiálisis tienden a acumular el fluoruro más rápido de lo normal y por lo tanto también tienen un mayor riesgo de presentar efectos adversos; mientras que el consumo de alimentos que acidifican la orina como la dieta vegetariana, el consumo de tamarindo, el consumo de algunos medicamentos y la baja altura del lugar de residencia pueden favorecer la eliminación de fluoruro a través de la orina y limitar su efecto tóxico<sup>3</sup>.

El agua de bebida es la principal fuente de fluoruro, y aunque se han implementado políticas para regular la exposición a través de ella, en general no se consideran las fuentes adicionales de fluoruro, como la sal fluorada, productos dentales, algunos téis, el fluoruro presente en bebidas embotelladas, los plaguicidas a base de fluoruro como la creolita y el suelo, en un análisis integral; sin embargo, las concentraciones altas de fluoruro en el suelo pueden llegar a contribuir de manera importante a la exposición, especialmente en los niños, quienes por su comportamiento y características se encuentran en un mayor riesgo que los adultos. Finalmente, la fluorosis dental, que muchas veces no es considerada un problema de salud sino estético, continúa siendo el efecto criterio para establecer los niveles “seguros” de fluoruro, lo que significa un riesgo para la salud, pues como ya vimos, otras alteraciones pueden presentarse antes y a menores grados de exposición a fluoruro.

## Referencias

- <sup>1</sup> <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm4841bx.htm>
- <sup>2</sup> National Research Council (NRC). Fluoride in Drinking Water: A Scientific Review of EPA's Standards. The National Academies Press. (2006).
- <sup>3</sup> Buzalaf MA, Whitford GM. Fluoride Metabolism. in Monographs in oral science 22, 20–36 (2011).
- <sup>4</sup> DenBesten P, Li W. Chronic fluoride toxicity: Dental fluorosis. Fluoride Oral Environ. 22, 81–96 (2011).
- <sup>5</sup> Bashash M, Thomas D, Hu H, Martínez-Mier A, Sánchez BN, Basu N, Peterson KE, Ettinger AS, Wright R, Zhang Z, Liu Y, Schnaas L, Mercado-García A, Téllez-Rojo MM, Hernández-Ávila M. Prenatal Fluoride Exposure and Cognitive Outcomes in Children at 4 and 6 – 12 Years of Age in Mexico. Environmental Health. Perspect. 1, 1–12 (2016).
- <sup>6</sup> Khandare AL, Gourineni SR, Validandi V. Dental fluorosis, nutritional status, kidney damage, and thyroid function along with bone metabolic indicators in school-going children living in fluoride-affected hilly areas of Doda district, Jammu and Kashmir, India. Environ. Monit. Assess. 189, 579 (2017).
- <sup>7</sup> Xiong XZ, Liu JL, He WH, Xia T, He P, Chen XM, Yang KD, Wang AG. Dose-effect relationship between drinking water fluoride levels and damage to liver and kidney functions in children. Environ. Res. 103, 112–116 (2007).
- <sup>8</sup> Estrada-Capetillo BL, Ortiz-Pérez MD, Salgado-Bustamante M, Calderón-Aranda E, Rodríguez-Pinal CJ, Reynaga-Hernández ER, Corral-Fernández NE, González-Amaro R, Portales-Pérez DP. Arsenic and fluoride co-exposure affects the expression of apoptotic and inflammatory genes and proteins in mononuclear cells from children. Mutat. Res. 761, 27–34 (2014).
- <sup>9</sup> Varol E, Akcay S, Ersoy IH, Koroglu BK, Varol S. Impact of chronic fluorosis on left ventricular diastolic and global functions. Sci. Total Environ. 408, 2295–2298 (2010).
- <sup>10</sup> Sun L, Gao Y, Liu H, Zhang W, Ding Y, Li B, Li M, Sun D. An assessment of the relationship between excess fluoride intake from drinking water and essential hypertension in adults residing in fluoride endemic areas. Sci. Total Environ. 443, 864–869 (2013).
- <sup>11</sup> Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Aguilar-Madrir G, Sánchez-Peña LC, Barrera-Hernández A, Domínguez-Guerrero A, González-Horta C, Barbier OC, Del Razo LM. Evaluation of kidney injury biomarkers in an adult Mexican population environmentally exposed to fluoride and low arsenic levels. Toxicol. Appl. Pharmacol. 352, 97–106 (2018).

## ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO RELACIONADOS A LA EXPOSICIÓN DE ARSÉNICO Y FLUORURO

Mónica I. Jiménez Córdova, Mariana Cárdenas González,  
María Deogracias Ortiz Pérez, y Luz María Del Razo

### Efectos adversos del arsénico en México

La mayoría de los estudios realizados en México que abordan los efectos adversos del arsénico en la población mexicana se han realizado en comunidades de Chihuahua, Durango, San Luis Potosí (SLP), Zimapán y La Comarca Lagunera. En esta última región es en donde se ha realizado la mayoría de ellos, ya que desde principios de la década de los 70's se reportaron efectos a la salud por el consumo de agua subterránea.

En la Tabla 3.1 se muestran un resumen de los niveles de arsénico y los principales hallazgos encontrados en estos estudios tanto en niños como en adultos.

**Tabla 3.1.** Efectos adversos en niños y adultos expuestos ambientalmente a arsénico reportados por estudios realizados en México

| Región                                | Edad años      | As en agua mg/L | As total en orina | Hallazgos  |   |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|--|---|
| <b>Estudios en población infantil</b> |                |                 |                   |  |   |
| Comarca Lagunera                      | 6-8            | NR              | 55 µg/L           | Problemas cognitivos, alteraciones en la conducta y TDAH <sup>1</sup>          |   |
|                                       | 6-8            | NR              | 58 µg/L           | Disminución de la función cognitiva <sup>2</sup>                               |   |
|                                       | 6-11           | NR              | 116 µg/L          | Alteración de la respuesta inmune <sup>3</sup>                                 |   |
|                                       | 5-15           | 0.073           | 122 µg/g Cr       | Incremento de marcadores de inflamación crónica <sup>4</sup>                   |   |
|                                       | 6-12           | 0.152           | 141 µg/L          | Reducción de la capacidad pulmonar <sup>5</sup>                                |   |
|                                       | 6-12           | 0.103           | 151 µg/L          | Inflamación y alteración de parámetros pulmonares <sup>6</sup>                 |   |
|                                       | 6-12           | 0.152           | 147 µg/L          | Metilación del DNA en genes asociados con enfermedades pulmonares <sup>7</sup> |   |
|                                       | 6-11           | 0.013           | 115 µg/L          | Daño al ADN y reducción de su reparación <sup>8</sup>                          |   |
|                                       | 5-10           | 0.016           | 43 µg/g Cr        | Daño al ADN <sup>9</sup>   |   |
|                                       | Recién nacidos |                 | 0.024             | 35 µg/L  | Menor edad gestacional y bajo peso y talla al nacer <sup>10</sup>                       |
|                                       |                |                 | 0.054             | 61 µg/L  | Alteraciones metabólicas <sup>11</sup>  |
|                                       |                |                 | 0.051             | 64 µg/L  | Modificación de la expresión de microRNAs que regulan la respuesta inmune <sup>12</sup> |
|                                       |                |                 | 0.054             | 74 µg/L  | Metilación del ADN <sup>13</sup>  |

|                            |             |              |  |   |
|----------------------------|-------------|--------------|--|---|
| SLP                        | 6-9         | NR           | 63 µg/g Cr   | Disminución de CI verbal y memoria a largo plazo <sup>14</sup>                          |
|                            | 6-10        | 0.169        | 116 µg/g Cr  | Disfunción cognitiva <sup>15</sup>  |
|                            | 5-12        | 0.012        | 45 µg/L  | Daño renal <sup>16</sup>  |
|                            | 6-12        | 0.154        | 6.9-122 µg/L   | Disminución de la respuesta inmune <sup>17</sup>  |
|                            | 4-10        | NR           | 40 µg/g Cr   | Daño genético <sup>18</sup>   |
|                            | 4-11        | NR           | 44 µg/g Cr   | Daño al ADN y reducción de su reparación <sup>19</sup>                                  |
|                            | 6-12        | NR           | 26 µg/g Cr   | Metilación global del ADN <sup>20</sup>   |
|                            | 6-12        | NR           | 30 µg/g Cr   | Modificación de la expresión de microRNAs asociados a daño cardiovascular <sup>21</sup> |
| Zimapán,<br>Hidalgo        | 6-10        |              | 194 µg/L   | Inmunosupresión <sup>22</sup>   |
|                            | 3-14        | 0.068        | 79 µg/L  | Aumento de marcadores de aterosclerosis <sup>23</sup>                                   |
|                            | 3-8         | 0.068        | 59 µg/L  | Incremento de la presión arterial y alteraciones cardíacas <sup>24</sup>                |
| <b>Estudios en adultos</b> |             |              |  |   |
| Comarca<br>Lagunera        | 20-60       | 0.41         | NR   | Incremento de lesiones en piel <sup>25</sup>  |
|                            | 20-70       | 0.40         | 489 µg/g Cr  | Alteración del perfil de porfirinas <sup>26</sup>                                       |
|                            | 15-60       | 0.116        | 398 µg/L<br>Incremento de los niveles de bilirrubina <sup>28</sup> | Modificación de la biosíntesis del grupo hemo <sup>27</sup>                             |
|                            | 25-68       | 0.412        | 758 µg/L   | Disminución de respuesta inmune <sup>29</sup>   |
|                            | 20-60       | 0.408        | 739 µg/L   | Daño citogenético <sup>30</sup>   |
|                            | 45-73       | 0.002-0.09   | 46 µg/L  | Disminución de respuesta inmune <sup>31</sup>   |
|                            | 51-73       | 0.002-0.09   | 44 µg/L  | Alteración de la respuesta inmune <sup>32</sup>   |
|                            | 30-87       | 0.020-0.4    | 112 µg/g Cr  | Mayor riesgo de diabetes mellitus tipo 2 <sup>33</sup>                                  |
|                            | Media de 50 | 0.043        | 41 µg/L  | Aumento en la prevalencia de diabetes <sup>34</sup>                                     |
| Zimapán,<br>Hidalgo        | 15-51       | 0.115        | 121 µg/g Cr  | Lesiones en piel <sup>35</sup>  |
|                            | 18-50       | 0.104        | 94 µg/g Cr   | Mayor riesgo de lesiones pre-malignas <sup>36</sup>                                     |
|                            | 18-51       | 0.104        | 81 µg/g Cr   | Incremento del factor de crecimiento epidermal (TGF- $\alpha$ ) <sup>37</sup>           |
|                            | 13-59       | 0.110        | 63 µg/g Cr   | Metilación del ADN <sup>38</sup>  |
|                            | Media de 50 | 0.043        | 41 µg/L  | Aumento en la prevalencia de diabetes <sup>34</sup>                                     |
|                            | Media de 34 | 0.043        | NR   | Mayor riesgo de diabetes <sup>39</sup>  |
| Chihuahua                  | Media de 56 | 0.06         | 92 µg/L  | Incremento en la prevalencia de diabetes <sup>40</sup>                                  |
|                            | 18-79       | 0.070        | 92 µg/L  | Alteraciones metabólicas <sup>41</sup>  |
|                            | 20-71       | 0.064        | 84 µg/L  | Metilación del ADN <sup>42</sup>  |
|                            | Media de 46 | 0.048        | 56 µg/L  | Riesgo cardiometabólico <sup>43</sup>   |
| Sonora                     | 23-63       | 0.043        | NR   | Daño al ADN y reducción de su reparación <sup>44</sup>                                  |
| SLP                        | 18-47       | 0.0150-0.131 | 435 µg/g Cr  | Muerte celular e inflamación <sup>45</sup>  |

**Abreviaturas:** SLP, San Luis Potosí; NR, no reportado; Cr, creatinina; CI, cociente intelectual; TDAH, trastorno por déficit de atención e hiperactividad.

## Efectos del arsénico en la población infantil

La Comarca Lagunera es sin duda la región donde se han realizado la mayoría de los estudios de arsénico en población infantil en México, dado que es la región donde primero se reportó las concentraciones altas de arsénico. Las investigaciones en esta región muestran que la exposición a arsénico se relaciona con una disminución de la función cognitiva, alteraciones en la conducta y el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH)<sup>2</sup>; así como, con la disminución en la respuesta inmune<sup>3</sup> y el incremento de marcadores de inflamación crónica<sup>4</sup>. Además, en niños expuestos a niveles altos de arsénico desde la etapa intrauterina y durante la infancia se observa una reducción de la función pulmonar, el incremento de biomarcadores de inflamación en esputo y metilación del DNA en genes que se relacionan con el desarrollo de enfermedades pulmonares<sup>5-7</sup>. Otros estudios por su parte muestran que los niños expuestos a arsénico de esta región presentan un mayor daño en el ADN y una menor capacidad de reparación del mismo, lo que puede favorecer el riesgo de cáncer<sup>8,9</sup>. Los estudios más recientes, realizados en mujeres y sus recién nacidos reportan una menor edad gestacional y bajo peso y talla al nacer en los niños; así como algunas modificaciones epigenéticas, tales como alteraciones que indican cambios en las vías metabólicas de vitaminas, aminoácidos y en el ciclo de Krebs, alteración en la expresión de microRNAs asociados con la regulación de la respuesta inmune, y una metilación global del ADN; tales modificaciones pueden incrementar la susceptibilidad de estos niños de presentar enfermedades crónicas a lo largo de su vida<sup>10-13</sup>.

En escolares residentes de San Luis Potosí se ha observado una disminución del cociente intelectual (CI), un indicador asociado a la inteligencia o función cognitiva, y una pérdida de memoria a largo plazo<sup>14,15</sup>. El daño renal<sup>16</sup>, la disminución en la respuesta inmune<sup>17</sup> y el daño genético también han sido reportados en niños expuestos a arsénico de esta región<sup>18,19</sup>. Los estudios más recientes reportan un daño epigenético en los niños de la región, específicamente se observa un incremento en la metilación del ADN<sup>20</sup>, que puede incrementar el riesgo de cáncer, y la alteración en la expresión de un microRNA (miR-126), el cual se ha relacionado con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares<sup>21</sup>.

En niños residentes del municipio de Zimapán, Hidalgo se ha identificado un estado de inmunosupresión, lo cual puede incrementar el riesgo de infecciones y el desarrollo de procesos cancerosos en los niños expuestos a arsénico<sup>22</sup>; así mismo, se ha identificado el incremento de marcadores de aterosclerosis (grosor de la íntima media carotídea y la dimetilarginina asimétrica), alteraciones en la morfología cardíaca y un aumento de los valores de presión arterial, lo que muestra el efecto tóxico a nivel cardiovascular del arsénico en los niños<sup>23,24</sup>.

## Efectos del arsénico en adultos

Las primeras investigaciones que reportaron los efectos tóxicos del arsénico en México fueron realizadas en la Comarca Lagunera. En algunas comunidades de esta región una alta proporción de individuos presentaban lesiones en piel (hipo e hiperpigmentación, queratosis y úlceras) como resultado de la ingestión elevada de arsénico<sup>25</sup>; así como alteraciones en los niveles de porfirinas, bilirrubinas y biosíntesis del grupo hemo<sup>26-28</sup>. Las porfirinas son compuestos no proteicos que se unen al hierro para formar el grupo hemo, el cual forma una parte fundamental para el funcionamiento de las hemoproteínas (hemoglobina, mioglobina, citocromos y algunas enzimas). Otros estudios observaron una disminución en células del sistema inmune, así como alteraciones cromosómicas en linfocitos y células de la mucosa bucal y vejiga<sup>29,30</sup>. La disminución

de la respuesta inmunitaria por el arsénico es señalada como la posible responsable de favorecer la infección por el virus del papiloma humano (VPH), incrementando el riesgo de cáncer de piel no melanoma en las personas<sup>31,32</sup>. Posteriormente otros estudios realizados en la región reportaron una mayor prevalencia de personas con diabetes y se estimó que el consumo de arsénico puede incrementar al doble el riesgo de padecer diabetes mellitus tipo 2<sup>33,34</sup>.

En la región de Zimapán, Hidalgo se han realizado varias investigaciones que muestran la presencia de lesiones en piel en las personas expuestas a arsénico, sobre todo en aquellas que además tienen el polimorfismo *AS3MT*, el cual es una variante genética cuya presencia favorece el desarrollo de lesiones pre-malignas por el arsénico<sup>35,36</sup>; así mismo, reportan un incremento del factor de crecimiento epidermal (TGF- $\alpha$ ), una proteína asociada con el desarrollo de cáncer de vejiga<sup>37</sup>. Además, las personas con mayor exposición a arsénico en la región presentan un incremento en la metilación del ADN, alteración epigenética que puede favorecer el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, cáncer y diabetes<sup>38</sup>. Otros estudios muestran que el consumo de agua con niveles altos de arsénico se relaciona con una mayor prevalencia de diabetes; y que la presencia de algunas variantes genéticas en la población incrementan el potencial diabetogénico del arsénico<sup>34,39</sup>.

En el estado de Chihuahua algunos estudios han reportado que la exposición a arsénico se relaciona con una mayor prevalencia de personas con diabetes<sup>40</sup>; así como con alteraciones epigenéticas tales como metilación del ADN y alteraciones en 59 metabolitos, que se asocian con el ciclo de Krebs y el metabolismo de aminoácidos, los cuales tienen implicaciones importantes en el desarrollo de diabetes y cáncer de vejiga por la exposición a arsénico<sup>41,42</sup>. En un estudio publicado en el 2015 muestra un aumento en los niveles de colesterol, triglicéridos y glucosa en sangre, lo que significa un riesgo cardiometabólico, es decir una mayor probabilidad de presentar diabetes y/o una enfermedad cardiovascular en las personas expuestas a arsénico<sup>43</sup>.

En el Valle del Yaquí en Sonora un estudio reportó un mayor daño al ADN y una reducción en la reparación de éste en las personas que consumían agua con concentraciones de 0.043  $\mu\text{g}$  de arsénico por litro de agua, lo que puede favorecer el desarrollo de cáncer. Por otro lado, un estudio realizado en San Luis Potosí mostró que las células mononucleares de sangre periférica de personas expuestas a arsénico expresaban genes relacionados con muerte celular y un perfil inflamatorio característico<sup>45</sup>.

### Efectos adversos del fluoruro en México

La mayoría de las investigaciones que abordan los efectos adversos del fluoruro en la población mexicana se han realizado en zonas con concentraciones altas de fluoruro en agua de bebida; sin embargo, también se han llevado a cabo algunos estudios en zonas con concentraciones de fluoruro alrededor de 0.7 mg/L, concentración considerada “óptima”. En la Tabla 3.2 se resumen los principales efectos tóxicos asociados a la exposición del fluoruro reportados dentro del territorio nacional, los cuales son descritos posteriormente con un mayor detalle.

**Tabla 3.2.** Efectos adversos en niños y adultos expuestos fluoruro reportados por estudios realizados en México

| Población        | Estados           | Edad años | F en agua, mg/L | F en orina                         | Hallazgos  |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|------------------------------------|--|
| Niños            | Varios            | 3-15      | 0.18->6.0       | NR                                 | Alta prevalencia de fluorosis dental <sup>46,47</sup>                    |
|                  | Durango           | 6-12      | 1.5-5.0         | NR                                 | Mayor frecuencia de fracturas en huesos <sup>48</sup>                    |
|                  | Durango y SLP     | 6-10      | 5.3             | 6 mg/L                             | Reducción del CI verbal, de desarrollo y total <sup>15</sup>             |
|                  |                   | 6-13      | 8.2             | 5.7 mg/ g Cr                       | Muerte de células mononucleares <sup>49</sup>                            |
|                  | Durango y Jalisco | 0.16-1.25 | 3.1             | 2.7 mg/L                           | Disminución del índice de desarrollo mental <sup>50</sup>                |
|                  | SLP               | 6-12      | 5.3             | 1.0-8.8 mg/L                       | Disminución de la respuesta inmune <sup>17</sup>                         |
|                  | Chihuahua         | 15-20     | 5.3             | 2.2 mg/g Cr                        | Disminución de los niveles hormonales de T3 <sup>51</sup>                |
|                  |                   | 6-12      | 1.9             | 2.7 mg/L                           | Incremento de marcadores de aterosclerosis <sup>52</sup>                 |
| Ciudad de México | 4 y 6-12          | 1.3       | 0.8 mg/L        | Disfunción cognitiva <sup>53</sup> |  |
| Adultos          | Durango           | 13-60     | 1.5-5.0         | NR                                 | Mayor frecuencia de fracturas en huesos <sup>48</sup>                    |
|                  |                   | 13-65     | 2.0             | 3.2 mg/g Cr                        | Alteración en linfocitos T reguladores <sup>54</sup>                     |
|                  | SLP               | 20-50     | 3.0             | 3.2 mg/ g Cr                       | Alteraciones de los niveles de las hormonas inhibina y FSH <sup>55</sup> |
|                  |                   | 18-47     | 1.9-4.0         | 2.1-7.3 mg/g Cr                    | Muerte celular e Inflamación <sup>45</sup>                               |
|                  | Chihuahua         | 18-60     | 0.7-8.6         | NR                                 | Prevalencia de fluorosis dental del 84% <sup>46</sup>                    |
|                  |                   | 18-77     | 1.5             | 2.0 mg/L                           | Incremento de marcadores de daño renal <sup>56</sup>                     |

**Abreviaturas:** SLP, San Luis Potosí; CI, cociente intelectual; Cr, creatinina; FSH, hormona foliculo estimulante; NR, no reportado.

### Fluorosis dental: una problemática nacional

La fluorosis dental es sin duda el efecto adverso reportado con mayor frecuencia, y es considerado un problema de salud pública en algunos estados de la zona norte y centro del país. Algunos estudios que fueron realizados durante el año 2000 al 2015 en varios estados muestran prevalencias de fluorosis dental que van desde el 15.5 hasta un 100 por ciento en algunas comunidades, incluso en lugares como Oaxaca, Morelos, Ciudad de México y Campeche, las cuales tienen concentraciones de fluoruro en el agua de bebida de alrededor de 0.7 mg/L, consideradas “óptimas”<sup>46,47</sup>; lo cual puede deberse a un consumo adicional de fluoruro a través de otras fuentes, como la pasta dental, la sal fluorada y algunas bebidas embotelladas, como jugos y refrescos, lo que incrementa la cantidad de fluoruro ingerida diariamente y la aparición de problemas de fluorosis dental en lugares donde normalmente no representa un problema de salud.

Por otro lado, a pesar de que en varias regiones del país se consume agua con concentraciones que pueden ocasionar fluorosis esquelética (4 mg/L), los reportes de esta enfermedad en México han sido poco estudiados, solamente en SLP y el Valle de Guadiana en Durango se han reportado algunas alteraciones óseas y una mayor frecuencia de fracturas en huesos de niños y adultos,

pero en ningún caso una etapa clínica de enfermedad<sup>48</sup>. El agua de bebida es la principal fuente de exposición a fluoruro y existe una clara relación entre la concentración de fluoruro en el agua de bebida y el grado de fluorosis dental.

### Efectos del fluoruro en la población infantil

En México se han realizado algunas investigaciones que muestran la presencia de varios efectos adversos, además de la fluorosis dental, en niños de varias regiones del país. En los estados de Durango y SLP, se ha reportado una disminución importante del cociente intelectual (CI) en niños de 6 a 10 años que ingieren agua con altos niveles de fluoruro<sup>15</sup>; así como un incremento en la muerte de células mononucleares de sangre periférica, las cuales son un componente crítico en la defensa del organismo<sup>49</sup>; así mismo, en niños de SLP se observa una disminución en la expresión de moléculas de activación como CD25, que regulan la respuesta inmune de las células<sup>17</sup>. En los estados de Durango y Jalisco se realizó un estudio en mujeres embarazadas que reportó una disminución en el índice de desarrollo mental en los primeros meses de vida en los hijos de las mujeres que consumían agua con altas concentraciones de fluoruro durante el primer y segundo trimestre de gestación, evidenciando el efecto adverso del fluoruro en la etapa prenatal<sup>50</sup>. Dos estudios realizados en el estado de Chihuahua muestran por un lado, una disminución en la secreción de la hormona triyodotironina (T3), la cual es producida por la tiroides y cuya reducción es vinculada con el desarrollo de hipotiroidismo<sup>51</sup>; por otro lado el incremento de algunos marcadores de aterosclerosis (VCAM-1, ICAM-1 y el grosor de la íntima media carotídea) en los niños expuestos a fluoruro<sup>52</sup>. En lugares como la Ciudad de México donde las concentraciones de fluoruro son menores (entre 0.4 y 1 mg/L) en comparación con los reportados en otros estudios; se ha observado una relación entre las concentraciones de fluoruro en la orina de la madre durante el embarazo y la disminución del índice cognitivo general y del CI en los hijos a la edad de 4 y 6 a 12 años, respectivamente<sup>53</sup>. Los resultados de estos estudios muestran que el fluoruro puede afectar el desarrollo cognitivo, la función tiroidea, favorecer el desarrollo de aterosclerosis y disminuir la respuesta inmune, lo cual puede tener un gran impacto en la salud de los niños y en el desarrollo de enfermedades crónicas en la edad adulta.

### Efectos del fluoruro en adultos

En los estados de SLP, Durango y Chihuahua se han realizado algunos estudios en adultos que relacionan el consumo crónico de fluoruro con efectos adversos a nivel reproductivo, renal y del sistema inmune. En 1998 fue realizado un estudio que mostró una disminución de los niveles de inhibina y el incremento anormal en los niveles de la hormona folículo estimulante (FSH) en un grupo de hombres expuestos a fluoruro a través de agua de bebida y de forma ocupacional<sup>55</sup>, evidenciando la capacidad del fluoruro para afectar la fertilidad de los individuos. Otros estudios mostraron una alteración en los linfocitos T reguladores, que regulan la respuesta y cuya alteración puede favorecer el desarrollo de enfermedades infecciosas, autoinmunes y cáncer<sup>54</sup>; así mismo, se ha identificado una expresión de genes que se relacionan con la muerte celular y un estado inflamatorio en quienes se encuentran expuestos a fluoruro<sup>45</sup>. Por otro lado, recientemente se relacionó la exposición a fluoruro a través del agua de bebida y el daño renal en adultos, el cual fue evaluado por biomarcadores de daño renal temprano como albúmina, cistatina C, KIM-1 y osteopontina, los cuales son proteínas que se incrementan de forma significativa en la orina de pacientes con problemas renales; demostrando el efecto tóxico del fluoruro en la función renal<sup>56</sup>.

### Referencias

- 1 Rosado JL, Ronquillo D, Kordas K, Rojas O, Alatorre J, Lopez P, Garcia-Vargas G, Del Carmen Caamaño M, Cebrián ME, Stoltzfus RJ. Arsenic exposure and cognitive performance in Mexican schoolchildren. *Environ. Health Perspect.* 115, 1371–5 (2007).
- 2 Roy A, Kordas K, Lopez P, Rosado JL, Cebrian ME, Vargas GG, Ronquillo D, Stoltzfus RJ. Association between arsenic exposure and behavior among first-graders from Torreón, Mexico. *Environ. Res.* 111, 670–676 (2011).
- 3 Pineda-Zavaleta AP, García-Vargas G, Borja-Aburto VH, Acosta-Saavedra LC, Vera Aguilar E, Gómez-Muñoz A, Cebrián ME, Calderón-Aranda ES. Nitric oxide and superoxide anion production in monocytes from children exposed to arsenic and lead in region Lagunera, Mexico. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 198, 283–290 (2004).
- 4 Escobar-García DM, Del Razo LM, Sánchez-Peña LC, Mandeville PB, Lopez-Campos C, Escudero-Lourdes C. Association of glutathione S-transferase  $\Omega$  1-1 polymorphisms (A140D and E208K) with the expression of interleukin-8 (IL-8), transforming growth factor beta (TGF- $\beta$ ), and apoptotic protease-activating factor 1 (Apaf-1) in humans chronically exposed to arsenic in drinking water. *Arch. Toxicol.* 86, 857–868 (2012).
- 5 Recio-Vega R, Gonzalez-Cortes T, Olivas-Calderon E, Lantz RC, Gandolfi AJ, Alba CG-D. In utero and early childhood exposure to arsenic decreases lung function in children. *J. Appl. Toxicol.* 35, 358–366 (2015).
- 6 Olivas-Calderón E, Recio-Vega R, Gandolfi AJ, Lantz RC, González-Cortes T, Gonzalez-De Alba C, Froines JR, Espinosa-Fematt JA. Lung inflammation biomarkers and lung function in children chronically exposed to arsenic. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 287, 161–167 (2015).
- 7 Gonzalez-Cortes T, Recio-Vega R, Lantz RC, Chau BT. DNA methylation of extracellular matrix remodeling genes in children exposed to arsenic. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 329, 140–147 (2017).
- 8 Méndez-Gómez J, García-Vargas G-G, López-Carrillo L, Calderón-Aranda E-S, Gómez A, Vera E, Valverde M, Cebrián ME, Rojas E. Genotoxic Effects of Environmental Exposure to Arsenic and Lead on Children in Region Lagunera, Mexico. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1140, 358–367 (2008).
- 9 Sampayo-Reyes A, Hernández A, El-Yamani N, López-Campos C, Mayet-Machado E, Rincón-Castañeda CB, Limones-Aguilar M de L, López-Campos JE, de León MB, González-Hernández S, Hinojosa-Garza D, Marcos R. Arsenic Induces DNA Damage in Environmentally Exposed Mexican Children and Adults. Influence of GSTO1 and AS3MT Polymorphisms. *Toxicol. Sci.* 117, 63–71 (2010).
- 10 Laine JE, Bailey KA, Rubio-Andrade M, Olshan AF, Smeester L, Drobná Z, Herring AH, Stýblo M, García-Vargas GG, Fry RC. Maternal Arsenic Exposure, Arsenic Methylation Efficiency, and Birth Outcomes in the Biomarkers of Exposure to ARsenic (BEAR) Pregnancy Cohort in Mexico. *Environ. Health Perspect.* (2014). doi:10.1289/ehp.1307476
- 11 Laine JE, Bailey KA, Olshan AF, Smeester L, Drobná Z, Stýblo M, Douillet C, García-Vargas G, Rubio-Andrade M, Pathmasiri W, McRitchie S, Sumner SJ, Fry RC. Neonatal Metabolomic Profiles Related to Prenatal Arsenic Exposure. *Environ. Sci. Technol.* 51, 625–633 (2017).
- 12 Rager JE, Bailey KA, Smeester L, Miller SK, Parker JS, Laine JE, Drobná Z, Currier J, Douillet C, Olshan AF, Rubio-Andrade M, Stýblo M, García-Vargas G, Fry RC. Prenatal arsenic exposure and the epigenome: Altered microRNAs associated with innate and adaptive immune signaling in newborn cord blood. *Environ. Mol. Mutagen.* 55, 196–208 (2014).
- 13 Rojas D, Rager JE, Smeester L, Bailey KA, Drobná Z, Rubio-Andrade M, Stýblo M, García-Vargas G, Fry RC. Prenatal Arsenic Exposure and the Epigenome: Identifying Sites of 5-methylcytosine Alterations that Predict Functional Changes in Gene Expression in Newborn Cord Blood and Subsequent Birth Outcomes. *Toxicol. Sci.* 143, 97–106 (2015).
- 14 Calderón J, Navarro ME, Jimenez-Capdeville ME, Santos-Díaz MA, Golden A, Rodríguez-Leyva I, Borja-Aburto V, Díaz-Barriga F. Exposure to Arsenic and Lead and Neuropsychological Development in Mexican Children. *Environ. Res.* 85, 69–76 (2001).
- 15 Rocha-Amador D, Navarro ME, Carrizales L, Morales R, Calderón J. Decreased intelligence in children and exposure to fluoride and arsenic in drinking water. *Cad. Saude Publica* 23 Sup 4, S579–S587 (2007).
- 16 Cárdenas-González M, Osorio-Yáñez C, Gaspar-Ramírez O, Pavković M, Ochoa-Martínez A, López-Ventura D, Medeiros M, Barbier OC, Pérez-Maldonado IN, Sabbiseti VS, Bonventre J V, Vaidya VS. Environmental exposure to arsenic and chromium in children is associated with kidney injury molecule-1. *Environ. Res.* 150, 653–662 (2016).
- 17 Estrada-Capetillo B, Salgado-Bustamante M, Calderón-Aranda E, Rodríguez-Pinal C, Reynaga-Hernández E, Corral-Fernández N, González-Amaro R, Portales-Pérez D. Arsenic and fluoride co-exposure affects the expression of apoptotic and inflammatory genes and proteins in mononuclear cells from children. *Mutat. Res.* 761, 27–34 (2014).
- 18 Gamiño-Gutiérrez SP, González-Pérez CI, Gonsebatt ME, Monroy-Fernández MG. Arsenic and lead contamination in urban soils of Villa de la Paz (Mexico) affected by historical mine wastes and its effect on children's health studied by micronucleated exfoliated cells assay. *Environ. Geochem. Health* 35, 37–51 (2013).
- 19 Jasso-Pineda Y, Díaz-Barriga F, Calderón J, Yáñez L, Carrizales L, Pérez-Maldonado IN. DNA Damage and Decreased DNA Repair in Peripheral Blood Mononuclear Cells in Individuals Exposed to Arsenic and Lead in a Mining Site. *Biol. Trace Elem. Res.* 146, 141–149 (2012).
- 20 Alegría-Torres JA, Carrizales-Yáñez L, Díaz-Barriga F, Rosso-Camacho F, Motta V, Tarantini L, Bollati V. DNA methylation changes in Mexican children exposed to arsenic from two historic mining areas in San Luis potosí. *Environ. Mol. Mutagen.* 57, 717–723 (2016).
- 21 Pérez-Vázquez MS, Ochoa-Martínez AC, Ruíz-Vera T, Araiza-Gamboa Y, Pérez-Maldonado IN. Evaluation of epigenetic alterations (mir-126 and mir-155 expression levels) in Mexican children exposed to inorganic arsenic via drinking water. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 28036–28045 (2017).
- 22 Soto-Peña GA, Luna AL, Acosta-Saavedra L, Conde P, López-Carrillo L, Cebrián ME, Bastida M, Calderón-Aranda ES, Vega L. Assessment of lymphocyte subpopulations and cytokine secretion in children exposed to arsenic. *FASEB J.* 20, 779–781 (2006).
- 23 Osorio-Yáñez C, Ayllon-Vergara JC, Aguilar-Madrid G, Arreola-Mendoza L, Hernández-Castellanos E, Barrera-Hernández A, De Vizcaya-Ruiz A, Del Razo LM. Carotid intima-media thickness and plasma asymmetric dimethylarginine in Mexican children exposed to inorganic arsenic. *Environ. Health Perspect.* 121, 1090–6 (2013).

- <sup>24</sup> Osorio-Yáñez C, Ayllon-Vergara JC, Arreola-Mendoza L, Aguilar-Madrid G, Hernández-Castellanos E, Sánchez-Peña LC, Del Razo LM. Blood Pressure, Left Ventricular Geometry, and Systolic Function in Children Exposed to Inorganic Arsenic. *Environ. Health Perspect.* (2015). doi:10.1289/ehp.1307327
- <sup>25</sup> Cebrian ME, Albores A, Aguilar M, Blakely E. Chronic Arsenic Poisoning in the North of Mexico. *Hum. Toxicol.* 2, 121–133 (1983).
- <sup>26</sup> García-Vargas GG, Del Razo LM, Cebrián ME, Albores A, Ostrosky-Wegman P, Montero R, Gonsebatt ME, Lim CK, De Matteis F. Altered Urinary Porphyrin Excretion in a Human Population Chronically Exposed to Arsenic in Mexico. *Hum. Exp. Toxicol.* 13, 839–847 (1994).
- <sup>27</sup> Hernández-Zavala A, Del Razo LM, García-Vargas GG, Aguilar C, Borja VH, Albores A, Cebrián ME. Altered activity of heme biosynthesis pathway enzymes in individuals chronically exposed to arsenic in Mexico. *Arch. Toxicol.* 73, 90–5 (1999).
- <sup>28</sup> Hernández-Zavala A, M. Del Razo L, Aguilar C, G. García-Vargas G, H. Borja V, E. Cebrián M. Alteration in bilirubin excretion in individuals chronically exposed to arsenic in Mexico. *Toxicol. Lett.* 99, 79–84 (1998).
- <sup>29</sup> Gonsebatt ME, Vega L, Montero R, García-Vargas G, Del Razo LM, Albores A, Cebrian ME, Ostrosky-Wegman P. Lymphocyte replicating ability in individuals exposed to arsenic via drinking water. *Mutat. Res. Mutagen. Relat. Subj.* 313, 293–299 (1994).
- <sup>30</sup> Gonsebatt ME, Vega L, Salazar AM, Montero R, Guzmán P, Blas J, Del Razo LM, García-Vargas G, Albores A, Cebrián ME, Kelsh M, Ostrosky-Wegman P. Cytogenetic effects in human exposure to arsenic. *Mutat. Res. Mutat. Res.* 386, 219–228 (1997).
- <sup>31</sup> Rosales-Castillo JA, Acosta-Saavedra L, Torres R, Ochoa-Fierro J, Borja-Aburto V, Lopez-Carrillo L, Garcia-Vargas G, Gurrola G, Cebrian M, Calderón-Aranda E. Arsenic exposure and human papillomavirus response in non-melanoma skin cancer Mexican patients: a pilot study. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 77, 418–423 (2004).
- <sup>32</sup> Salazar AM, Calderón-Aranda E, Cebrián ME, Sordo M, Bendesky A, Gómez-Muñoz A, Acosta-Saavedra L, Ostrosky-Wegman P. p53 Expression in circulating lymphocytes of non-melanoma skin cancer patients from an arsenic contaminated region in Mexico. A pilot study. *Mol. Cell. Biochem.* 255, 25–31 (2004).
- <sup>33</sup> Coronado-González JA, Del Razo LM, García-Vargas G, Sanmiguel-Salazar F, Escobedo-de la Peña J. Inorganic arsenic exposure and type 2 diabetes mellitus in Mexico. *Environ. Res.* 104, 383–389 (2007).
- <sup>34</sup> Del Razo LM, García-Vargas GG, Valenzuela OL, Castellanos EH, Sánchez-Peña LC, Currier JM, Drobná Z, Loomis D, Stýblo M. Exposure to arsenic in drinking water is associated with increased prevalence of diabetes: a cross-sectional study in the Zimapán and Lagunera regions in Mexico. *Environ. Heal.* 10, 73 (2011).
- <sup>35</sup> Valenzuela OL, Borja-Aburto VH, Garcia-Vargas GG, Cruz-Gonzalez MB, Garcia-Montalvo EA, Calderon-Aranda ES, Del Razo LM. Urinary trivalent methylated arsenic species in a population chronically exposed to inorganic arsenic. *Environ. Health Perspect.* 113, 250–4 (2005).
- <sup>36</sup> Valenzuela OL, Drobná Z, Hernández-Castellanos E, Sánchez-Peña LC, García-Vargas GG, Borja-Aburto VH, Stýblo M, Del Razo LM. Association of AS3MT polymorphisms and the risk of premalignant arsenic skin lesions. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 239, 200–207 (2009).
- <sup>37</sup> Valenzuela OL, Germolec DR, Borja-Aburto VH, Contreras-Ruiz J, García-Vargas GG, Del Razo LM. Chronic arsenic exposure increases TGF alpha concentration in bladder urothelial cells of Mexican populations environmentally exposed to inorganic arsenic. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 222, 264–270 (2007).
- <sup>38</sup> Smeester L, Rager JE, Bailey KA, Guan X, Smith N, García-Vargas G, Del Razo L-M, Drobná Z, Kelkar H, Stýblo M, Fry RC. Epigenetic changes in individuals with arsenicosis. *Chem. Res. Toxicol.* 24, 165–7 (2011).
- <sup>39</sup> Drobná Z, Del Razo LM, García-Vargas GG, Sánchez-Peña LC, Barrera-Hernández A, Stýblo M, Loomis D. Environmental exposure to arsenic, AS3MT polymorphism and prevalence of diabetes in Mexico. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 23, 151–5 (2013).
- <sup>40</sup> Currier JM, Ishida MC, González-Horta C, Sánchez-Ramírez B, Ballinas-Casarrubias L, Gutiérrez-Torres DS, Cerón RH, Morales DV, Terrazas FA, Del Razo LM, García-Vargas GG, Saunders RJ, Drobná Z, Fry RC, Matoušek T, Buse JB, Mendez MA, Loomis D, Stýblo M. Associations between arsenic species in exfoliated urothelial cells and prevalence of diabetes among residents of Chihuahua, Mexico. *Environ. Health Perspect.* 122, 1088–94 (2014).
- <sup>41</sup> Martin E, González-Horta C, Rager J, Bailey KA, Sánchez-Ramírez B, Ballinas-Casarrubias L, Ishida MC, Gutiérrez-Torres DS, Hernández Cerón R, Viniestra Morales D, Baeza Terrazas FA, Saunders RJ, Drobná Z, Mendez MA, Buse JB, Loomis D, Jia W, García-Vargas GG, Del Razo LM, Stýblo M, Fry R. Metabolomic Characteristics of Arsenic-Associated Diabetes in a Prospective Cohort in Chihuahua, Mexico. *Toxicol. Sci.* 144, 338–346 (2015).
- <sup>42</sup> Rager JE, Tilley SK, Tulenko SE, Smeester L, Ray PD, Yosim A, Currier JM, Ishida MC, González-Horta Mdel C, Sánchez-Ramírez B, Ballinas-Casarrubias L, Gutiérrez-Torres DS, Drobná Z, Del Razo LM, García-Vargas GG, Kim WY, Zhou YH, Wright, Stýblo M, Fry RC. Identification of Novel Gene Targets and Putative Regulators of Arsenic-Associated DNA Methylation in Human Urothelial Cells and Bladder Cancer. *Chem. Res. Toxicol.* 28, 1144–1155 (2015).
- <sup>43</sup> Mendez MA, González-Horta C, Sánchez-Ramírez B, Ballinas-Casarrubias L, Cerón RH, Morales DV, Terrazas FA, Ishida MC, Gutiérrez-Torres DS, Saunders RJ, Drobná Z, Fry RC, Buse JB, Loomis D, García-Vargas GG, Del Razo LM, Stýblo M. Chronic Exposure to Arsenic and Markers of Cardiometabolic Risk: A Cross-Sectional Study in Chihuahua, Mexico. *Environ. Health Perspect.* 124,(2015).
- <sup>44</sup> Andrew AS, Burgess JL, Meza MM, Demidenko E, Waugh MG, Hamilton JW, Karagas MR. Arsenic exposure is associated with decreased DNA repair in vitro and in individuals exposed to drinking water arsenic. *Environ. Health Perspect.* 114, 1193–8 (2006).
- <sup>45</sup> Salgado-Bustamante M, Ortiz-Pérez MD, Calderón-Aranda E, Estrada-Capetillo L, Niño-Moreno P, González-Amaro R, Portales-Pérez D. Pattern of expression of apoptosis and inflammatory genes in humans exposed to arsenic and/or fluoride. *Sci. Total Environ.* 408, 760–767 (2010).
- <sup>46</sup> Aguilar-Díaz F del C, Morales-Corona F, Cintra-Viveiro AC, De la Fuente-Hernández J. Prevalence of dental fluorosis in Mexico 2005-2015: A literature review. *Salud Publica Mex.* 59, 306–313 (2017).
- <sup>47</sup> Soto-Rojas AE, Ureña-Cirett JL, Martínez-Mier EDLA. A review of the prevalence of dental fluorosis in Mexico. *Rev. Panam. Salud Pública* 15, 9–18 (2004).

- <sup>48</sup> Alarcón-Herrera T, Martín-Domínguez IR, Trejo-Vázquez R, Rodríguez-Dozal S. Well water fluoride, dental fluorosis, and bone fractures in the Guadiana Valley of Mexico. *Fluoride* 34, 139–149 (2001).
- <sup>49</sup> Rocha-Amador DO, Calderón J, Carrizales L, Costilla-Salazar R, Nelinho Pérez-Maldonado I. Apoptosis of peripheral blood mononuclear cells in children exposed to arsenic and fluoride. (2011). doi:10.1016/j.etap.2011.08.004
- <sup>50</sup> Valdez Jiménez L, López Guzmán OD, Cervantes Flores M, Costilla-Salazar R, Calderón Hernández J, Alcaraz Contreras Y, Rocha-Amador DO. In utero exposure to fluoride and cognitive development delay in infants. *Neurotoxicology* 59, 65–70 (2017).
- <sup>51</sup> Ruiz-Payan A, Duarte-Gardea M, Ortiz M, Hurtado R. Chronic effects of fluoride on growth, blood chemistry, and thyroid hormones in adolescents residing in three communities in Northern Mexico. in *Abstracts, XXVth ISFR Conference* 26–29 (2005).
- <sup>52</sup> Jiménez-Cordova M, González-Horta M, Ayllón-Vergara J, Arreola-Mendoza L, Aguilar-Madrid G, Villareal-Vega E E, Barrera-Hernández A, Barbier O, Del Razo LM. Evaluation of vascular and kidney injury biomarkers in Mexican children exposed to inorganic fluoride. *Environ Res*, 169: 220–228 (2019).
- <sup>53</sup> Bashash M, Thomas D, Hu H, Martínez-Mier EA, Sanchez BN, Basu N, Peterson KE, Ettinger AS, Wright R, Zhang Z, Liu Y, Schnaas L, Mercado-García A, Téllez-Rojo MM, Hernández-Avila M. Prenatal Fluoride Exposure and Cognitive Outcomes in Children at 4 and 6 – 12 Years of Age in Mexico. *Environmental Health. Perspect.* 1, 1–12 (2016).
- <sup>54</sup> Hernández-Castro B, Vigna-Pérez M, Doníz-Padilla L, Ortiz-Pérez MD, Jiménez-Capdeville E, González-Amaro R, Baranda L. Effect of fluoride exposure on different immune parameters in humans. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 33, 169–177 (2011).
- <sup>55</sup> Ortiz-Pérez D, Rodríguez-Martínez M, Martínez F, Borja-Aburto VH, Castelo J, Grimaldo JI, de la Cruz E, Carrizales L, Díaz-Barriga F. Fluoride-induced disruption of reproductive hormones in men. *Environ. Res.* 93, 20–30 (2003).
- <sup>56</sup> Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Aguilar-Madrid G, Sanchez-Peña LC, Barrera-Hernández Á, Domínguez-Guerrero IA, González-Horta C, Barbier OC, Del Razo LM. Evaluation of kidney injury biomarkers in an adult Mexican population environmentally exposed to fluoride and low arsenic levels. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 352, 97–106 (2018).

## NECESIDAD DE DATOS Y SU VISIBILIDAD

Mónica I. Jiménez Córdova y Mariana Cárdenas González

Las transformaciones demográficas, económicas y sociales de México durante las últimas décadas han contribuido a una nueva configuración en el panorama de la salud nacional. México está bajo un proceso de transición entre un patrón de enfermedades infecciosas, desnutrición y alta mortalidad, hacia un perfil de mayor esperanza de vida, pero con el aumento de enfermedades no transmisibles crónico-degenerativas como las enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer<sup>1</sup>. Estas enfermedades resultan de la conjunción de factores genéticos, fisiológicos, socioeconómicos y ambientales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) hasta un 24 por ciento de las enfermedades a nivel mundial se deben a la exposición a riesgos ambientales que pueden evitarse<sup>2</sup>. Como se muestra en los capítulos 3.2 y 3.3 del presente libro, el consumo de agua con concentraciones altas de arsénico y/o fluoruro tiene múltiples implicaciones en la salud de los seres humanos durante toda la vida. En México la evaluación e identificación de riesgos en salud por la exposición a contaminantes ambientales, como el fluoruro y el arsénico, es una labor que se ha realizado desde la década de los 80 con la finalidad de proporcionar información para la normatividad mexicana y la toma de decisiones en salud<sup>3</sup>. Sin embargo, los resultados y la interpretación de los mismos son poco conocidos por los habitantes, autoridades o por los especialistas en salud. Lo anterior, limita la identificación del riesgo a la exposición y sus efectos en salud, minando así la operación de programas estratégicos preventivos y correctivos para la atención de los padecimientos, situaciones de riesgo que afectan a la comunidad en forma grave y frecuente.

El camino por recorrer en términos de salud ambiental en México es largo. Los datos en salud e investigación científica son necesarios para poder llevar a cabo un análisis y evaluación de la situación de salud en las diversas regiones del país. La evidencia en salud es producida por la recolección de datos de morbilidad, mortalidad y tendencias de una población. En México se ha hecho un gran esfuerzo por tener datos en salud confiables y disponibles para todos<sup>4</sup>; desafortunadamente, como en muchos otros países de Latinoamérica, aún existen dificultades en la recopilación, clasificación, análisis e integración de datos en salud, ocasionada en parte por la desarticulación entre los diferentes sectores e instituciones que integran el sistema de salud mexicano, así como por la falta de personal exclusivo y especializado para llevar a cabo esta labor en las instituciones de salud.

En México el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SINAVE, <http://sinave.gob.mx>) cuenta con información de 20,005 unidades de atención de la salud concentrada en la Dirección General de Epidemiología (DGE), órgano normativo federal del SINAVE, sin embargo, esta información no es de acceso público. Los datos disponibles por parte de Secretaría de Salud están en su mayoría enfocados a enfermedades de tipo infeccioso. Por parte de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la información disponible sobre salud no posee datos sobre riesgos ambientales, que no sean de tipo infeccioso o en ambientes laborales.

En materia ambiental, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), cuentan con varias herramientas y bases de datos que, si bien se han hecho mejoras importantes en su accesibilidad y presentación, la información es limitada e insuficiente. Por ejemplo, el INEGI a través del Sistema de Consulta de Estadísticas Ambientales con su sección de agua potable y saneamiento dispone de información sobre plantas tratadoras, sitios de descarga de aguas residuales o prestadores de servicio de agua potable<sup>5</sup>. Sin embargo, no tiene información relevante sobre calidad de agua para consumo humano. La SEMARNAT posee una base de estadísticas ambientales -BADESNIARN- que dispone un apartado de salud ambiental<sup>6</sup>. Sin

embargo, los datos se centran en información sobre riesgos ambientales de tipo infeccioso y laboral. El Espacio Digital Geográfico (ESDIG) de la SEMARNAT, muestra en mapas información sobre las características ambientales del país. Por ejemplo, su temática de agua tiene información relevante y fácil de interpretar sobre la situación actual de recurso a nivel nacional. Sin embargo, no cuenta con información de monitoreo sobre calidad de agua.

La falta de datos, aunada a la deficiente integración entre la información relacionada a la salud ambiental, limita la posibilidad de realizar un análisis de la situación en materia de ambiente y salud, y obstaculiza la toma de decisiones y diseño de políticas públicas encaminadas a prevenir y/o reducir problemas de salud ambiental en México.

Además de los datos epidemiológicos, una parte importante de la información necesaria para resolver problemas de salud relacionados con las exposiciones a contaminantes ambientales proviene de las investigaciones científicas. No obstante, los estudios realizados en México, que son las que proveen evidencia que toma en cuenta los factores específicos del panorama nacional, continúan siendo muy limitados<sup>3</sup>. Además, los puentes que hacen a esta información científica accesible para los tomadores de decisiones, las autoridades sanitarias y la población general son muy pocos, lo que ocasiona que los individuos y las instituciones no conozcan las amenazas para la salud que representan estos problemas de exposición ambiental y por lo tanto tengan una baja percepción del riesgo y no participen en la mitigación de estos problemas. Es necesaria la disponibilidad por parte de la academia de la divulgación pertinente de sus resultados, así como una participación propositiva y de mayor involucramiento con respecto a la generación de políticas públicas en materia de salud ambiental.

En México, es necesaria la generación, integración y difusión de los datos de salud y ambiente, para ello es importante contar con un sistema abierto y confiable de datos. La comunicación oportuna y eficiente de los problemas de salud asociados con riesgos ambientales como la mala calidad del agua, así como, la colaboración entre los generadores de esta información es vital para la prevención de enfermedades asociadas a factores de ambientales (modificables), sobre todo las de tipo crónico que representan un gasto mayor para el sector salud en México.

## Referencias

- <sup>1</sup> Soto-Estrada, G., Moreno-Altamirano, L. & Pahua Díaz, D. Panorama epidemiológico de México, principales causas de morbilidad y mortalidad. *Rev. la Fac. Med. UNAM* 59, 8–22 (2016).
- <sup>2</sup> World Health Organization (WHO). WHO | Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks. WHO (2016).
- <sup>3</sup> Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L. & Finkelman, J. La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. *Salud Pública de México* 55, 638–649 (2013).
- <sup>4</sup> Secretaría de Salud. Estadísticas: Salud en Números: DGIS. Disponible en: <http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/sinai/estadisticas.html>.
- <sup>5</sup> Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Sistema de Consulta de Estadísticas Ambientales. (2018). Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx/ambiental/map/indexV3FFM.html>.
- <sup>6</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (2018). Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-ambiental-y-de-recursos-naturales>.

## PROSPECTIVA DE LA SITUACIÓN: ¿CUÁLES SERÍAN LAS CONSECUENCIAS POTENCIALES DE LA NO-ACCIÓN?

Mariana Cárdenas González y María Eugenia Gonsebatt

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNTs), son enfermedades con una fuerte carga ambiental. La exposición al arsénico como al fluoruro se han asociado al desarrollo de varias ECNTs, como la diabetes, enfermedades cardiovasculares, neurológicas, enfermedad renal crónica y el cáncer<sup>1</sup>. Generalmente las ECNTs tienen un inicio silencioso, por ello su detección a etapas tempranas es difícil. Actualmente, las ECNTs son las causantes del 60% de todas las muertes a nivel mundial, 85% de las cuales ocurren en países con ingresos medios y bajos, y un 25% son personas menores de 60 años<sup>2</sup>. Su manejo y control trae consigo innegables e importantes consecuencias económicas, especialmente para economías vulnerables como las de países de bajo y medio ingreso. En Argentina, Brasil, Colombia y México, se calcula que la pérdida acumulada del Producto Interno Bruto (PIB) por el tratamiento de enfermedades cardíacas, infartos y diabetes en el periodo 2006-2015 fue de 13 mil millones de dólares<sup>3</sup>. Es así que la disminución de riesgos ambientales como la exposición a arsénico y/o fluoruro, es una estrategia razonable y sobre todo asequible para reducir la demanda en costos del tratamiento de las ECNTs.

La cantidad de personas afectadas por las ECNTs es difícil de calcular porque como mencionamos al principio, la mayoría de ellas tienen un inicio silencioso. Por otro lado, su asociación con la exposición es difícil de probar con los estudios poblacionales habituales que se hacen porque tienen un bajo costo y corto tiempo de realización. Por ejemplo, durante el periodo comprendido entre 1958 y 1970, los habitantes de algunas regiones en Antofagasta, una región al norte de Chile, estuvieron expuestos a concentraciones altas de arsénico. Cuarenta años después de intervenir el sitio se pudo comprobar de manera fehaciente que los pobladores de este lugar tenían un riesgo a padecer cáncer de 4 a 7 veces mayor que cualquier otra persona no expuesta en el mismo periodo de tiempo, y en la misma región<sup>4</sup>. Lo anterior ejemplifica perfectamente el reto que implica evaluar la relación entre la exposición crónica a arsénico y/o fluoruro, y el desarrollo de enfermedades crónicas de progresión lenta y silenciosa.

En el mundo cada año 119 mil nuevos casos de cáncer de vejiga, 121 mil de cáncer de pulmón y 110 mil de cáncer de piel se atribuyen a la exposición crónica a arsénico<sup>5</sup>. En Estados Unidos de Norteamérica, 10 años después de la reducción del límite máximo permisible de arsénico en agua de bebida (de 50 a 10  $\mu\text{g/L}$ ), se observó una reducción en los niveles de arsénico del 17% en la población general. Además, se estimó que habría una reducción de entre 200 a 900 casos de cáncer de pulmón y vejiga cada año<sup>6</sup>. Esto, sin duda representa un ahorro de recursos tanto a nivel de la salud pública como a nivel de las personas involucradas, así como una ganancia en la calidad de vida de la población general. Con respecto a la exposición a fluoruro, anteriormente se sugería que el consumo de fluoruro tenía un costo-beneficio enorme al prevenir la aparición de caries dental. Ahora sabemos que el consumo de agua con concentraciones de fluoruro mayores de 1.5 mg/L, induce efectos como fluorosis dental y esquelética. En 27 provincias de 5 diferentes regiones geográficas en China, se observó una reducción de casi el doble en la prevalencia de fluorosis dental en niños, después de la reducción de las concentraciones de fluoruro a niveles norma de 1.2 mg/L en el agua de bebida<sup>7</sup>. En México, el costo del tratamiento para corregir la apariencia de los dientes con fluorosis es superior a 3000 pesos por diente, y debe ser renovado en promedio cada 12 años.

Otra manera de calcular los costos sociales y económicos de las enfermedades asociadas con la exposición a arsénico y fluoruro es mediante un indicador llamado carga de enfermedad. Ésta es una medida de la pérdida de salud y la mortalidad debido a lesiones, enfermedades y riesgos que tiene el ser

humano y cuya finalidad es determinar el impacto de una enfermedad sobre las personas y su entorno social y económico. Este indicador facilita la toma de decisiones fundamentada en intervenciones encaminadas a la prevención y control de enfermedades. Las estimaciones de carga de enfermedad por la exposición a arsénico se hacen con relación a efectos como las lesiones en la piel y el cáncer. A nivel mundial la carga de enfermedad por lesiones en la piel causadas por la exposición crónica a arsénico va de 1.5 a 6.7 años de vida perdidos por discapacidad (DAILYs, por sus siglas en inglés)<sup>8</sup>. Los DAILYs calculados para fluorosis esquelética por exposición crónica a fluoruro llegan a ser hasta de 20 años de vida perdidos por discapacidad<sup>9</sup>.

Finalmente, debido a que los alcances de este capítulo se centran en salud humana, es importante resaltar que la escasez y mala calidad del agua tiene un impacto también sobre la *salud* de los ecosistemas, es decir el ambiente en el que vivimos y todo lo que en ellos se contiene, vivo y no-vivo. El ciclo del agua rige y mantiene el equilibrio de los ecosistemas, de los cuales el humano es una parte importante, pero no única. Cualquier acción que vulnere o reduzca el equilibrio del ecosistema eventualmente, directa o indirectamente, repercutirá sobre nuestra salud y la de nuestros descendientes, entendiéndolo a salud como no sólo una ausencia de enfermedad, sino también como una adecuada calidad de vida.

## Referencias

- <sup>1</sup> Prüss-Ustün A W J, Corvalán C, Bos R, Neira M. Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks. Geneva, World Health Organization. (2016).
- <sup>2</sup> WHO (World Health Organization) (2014). Global status report on noncommunicable diseases 2014. Disponible: <http://www.who.int/nmh/publications/ncd-status-report-2014/en/>
- <sup>3</sup> Abegunde DO, Mathers CD, Adam T, Ortegon M, Strong K. The burden and costs of chronic diseases in low-income and middle-income countries. *Lancet* 370(9603): 1929-1938 (2007).
- <sup>4</sup> Steinmaus CM, Ferreccio C, Romo JA, Yuan Y, Cortes S, Marshall G, L. Moore E, Balmes J R, Liaw J, Golden T, Smith AH. Drinking water arsenic in northern Chile: high cancer risks 40 years after exposure cessation. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 22(4): 623-630 (2013).
- <sup>5</sup> Oberoi S, Barchowsky A, Wu F. The global burden of disease for skin, lung, and bladder cancer caused by arsenic in food. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 23(7): 1187-1194. (2014).
- <sup>6</sup> Nigra AE, Sanchez TR, Nachman KE, Harvey DE, Chillrud SN, Graziano JH, Navas-Acien A. The effect of the Environmental Protection Agency maximum contaminant level on arsenic exposure in the USA from 2003 to 2014: an analysis of the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). *The Lancet Public Health* 2(11): e513-e521 (2017).
- <sup>7</sup> Wang C, Gao Y, Wang W, Zhao L, Zhang W, Han H, Shi Y, Yu G, Sun D. A national cross-sectional study on effects of fluoride-safe water supply on the prevalence of fluorosis in China. *BMJ open* 2(5) (2012).
- <sup>8</sup> Fewtrell L, Fuge R, Kay D. An estimation of the global burden of disease due to skin lesions caused by arsenic in drinking water. *J Water Health*. 3:101-107(2005).
- <sup>9</sup> Fewtrell L, Smith S, Kay D, Bartram J. An attempt to estimate the global burden of disease due to fluoride in drinking water. *J Water Health*. 4: 533-42 (2006).

# CAPÍTULO 4. TECNOLOGÍAS Y AVANCES CIENTÍFICOS

## INTRODUCCIÓN A SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN Y PROCESOS DE TRATAMIENTO

María Teresa Alarcón Herrera y Alejandra Martín Domínguez

### Introducción

Una de las acciones más importantes que necesita llevarse a cabo a nivel nacional en las comunidades afectadas por la presencia de fluoruro y arsénico, es evitar que se siga prolongando la exposición de sus habitantes a estos contaminantes. Esto implica la implementación de sistemas seguros de abastecimiento de agua, tanto para consumo humano como para la preparación de alimentos, ya sea cambiando los pozos contaminados por fuentes alternas de agua o mediante el uso de tecnologías adecuadas para su tratamiento.

Los sistemas de potabilización conocidos se caracterizan por conjuntar diversas tecnologías o procesos físicos, químicos y/o biológicos, para reducir la presencia de contaminantes, ya sean de origen natural o antropogénico, orientándose a obtener agua que sea apta para consumo humano de acuerdo con los lineamientos establecidos en la 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.

Existe una gran variedad de tecnologías que permiten remover el fluoruro y el arsénico del agua, ya sea de forma separada o simultáneamente, en función de los demás componentes de la misma. También se puede seleccionar la que se adapte mejor a comunidades urbanas o rurales, a escala doméstica o centralizada.

Los sistemas para uso doméstico (intra-domiciliarios) son de fácil operación y en general utilizan filtros con material adsorbente; sin embargo, su principal desventaja es que se deja en manos del usuario la responsabilidad del buen uso del dispositivo<sup>1,2</sup>.

Los sistemas centralizados son administrados por los organismos operadores de agua dependientes de los municipios y, como su nombre lo indica, son potabilizadoras que proporcionan el servicio a una comunidad, a una o a varias colonias. Su principal ventaja es que el control de la operación de éstas, de la calidad del agua que se distribuye a la población y del manejo de los residuos, es más sencillo y confiable; sin embargo, cualquier falla repercute en toda el agua tratada.

### Tecnologías de remoción de arsénico y fluoruro

Entre las tecnologías más estudiadas para remoción de arsénico y fluoruro (juntos o por separado), se encuentran las siguientes: 1) *clarificación convencional* (coagulación-floculación-sedimentación-filtración) utilizando sales de hierro en el caso del arsénico y de aluminio en el de fluoruro, la cual genera una gran cantidad de residuos que hay que tratar y disponer de forma adecuada; 2) *la filtración directa* (coagulación-filtración) se puede aplicar muy bien para remover arsénico

pero no fluoruro y consiste en la aplicación de un coagulante, como en el caso de clarificación convencional, pero seguida solamente de la etapa de filtración, ya sea en arena-antracita o en membranas de micro o ultra filtración; 3) *el intercambio iónico*, el cual utiliza resinas que atrapan a los contaminantes es un proceso que puede remover a los dos contaminantes de interés, pero que se aplica poco para grandes volúmenes de agua por los costos de los materiales y su regeneración, además de que requiere personal técnicamente calificado para operarse; 4) *la electrodiálisis* es un sistema electroquímico con membranas que también remueve los dos contaminantes juntos, pero sus costos y dificultades de operación le han impedido generalizarse; 5) *la deionización capacitiva* es un método novedoso pero con altos costos y dificultades para operar en sistemas grandes o con cambios bruscos de temperatura; 6) *la adsorción* en medios granulares afines a los contaminantes de interés, como la alúmina activada, el carbón de hueso y la hidroxiapatita para el caso de fluoruro, así como materiales a base de hierro para el arsénico, es al igual que la filtración directa, uno de los procesos más sencillos de operar. Sin embargo, los costos del proceso de adsorción son elevados debido a la necesidad de regenerar la capacidad de los medios o de cambiarlos cuando se saturan; 7) *la filtración con membranas presurizadas*, ya sea de nanofiltración o de ósmosis inversa, es un proceso que cada vez se utiliza más para potabilizar agua con problemas de sólidos disueltos, pero sus costos son todavía más elevados que los de la clarificación convencional y depende mucho de la presencia de los demás iones presentes en el agua; 8) *la electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio*, técnica electroquímica muy parecida a la clarificación convencional, puede remover los dos iones de interés, pero por sus costos no puede competir aún con ninguna de las tecnologías anteriores.

De todas las tecnologías mencionadas, las que tienen más posibilidad a corto plazo de aplicarse en México para sistemas centralizados son las siguientes: 1) *filtración directa* para remover arsénico a concentraciones inferiores a los 0.150 mg/L, 2) *clarificación convencional*, con coagulantes a base de hierro para arsénico o de aluminio para fluoruro, 3) *membranas de nanofiltración* para remover a los dos contaminantes juntos, pero con concentraciones de fluoruros por debajo de los 6 mg/L aproximadamente; y 4) *ósmosis inversa* para un amplio rango de concentraciones de los dos contaminantes, pero con los costos más elevados de todas las anteriores. Otra tecnología que podría llegar a ser competitiva, con los contaminantes juntos o por separado, es la adsorción, siempre y cuando se desarrollen medios en el país que permitan disminuir los costos.

Es importante señalar que en las últimas décadas se han realizado una gran cantidad de estudios a nivel científico y tecnológico para la remoción de ambos contaminantes. Se ha buscado disminuir costos y simplificar los sistemas con el objetivo de ser usados a diferentes escalas, principalmente en comunidades rurales y/o a nivel casero o familiar. Algunos de estos desarrollos, los cuales todavía no compiten en costos con los tradicionales, pero que pueden ser mencionados, son: *la fotocátalisis solar* y *la biorremediación* a través de humedales de tratamiento para la remoción de arsénico, así como *la adsorción con nanomateriales* y *la destilación solar* para la eliminación de ambos contaminantes<sup>3</sup>.

## Experiencia en México

A partir de los años 90's se han implementado en zonas del país con problemas de arsénico, un gran número de pequeñas plantas con tecnologías de membranas, principalmente de ósmosis inversa, seguida de nano, micro y ultrafiltración. Dichas tecnologías han probado remover eficientemente el arsénico del agua en sistemas comunitarios (para agua embotellada), pero también pueden utilizarse en sistemas centralizados.

En el estado de Chihuahua se encuentra el mayor número de plantas de ósmosis inversa (>320 plantas) operando en comunidades rurales para el llenado de garrafones; sin embargo,

esta tecnología se caracteriza por la generación de una gran cantidad de agua de rechazo y por producir un agua desmineralizada y altamente corrosiva que requiere ser remineralizada para evitar problemas de salud en la población<sup>4</sup>. La cantidad de agua de rechazo varía entre un 30 y 50% del agua alimentada, dependiendo de la calidad del agua y de la membrana utilizada, lo que genera un importante desperdicio de agua y desechos que deben disponerse de manera adecuada<sup>5</sup>.

La nanofiltración se ha desarrollado particularmente durante los últimos años, mostrando un alto potencial de competitividad en términos de selectividad y costo-beneficio comparada con los procesos de separación convencionales<sup>5</sup>. Sus propiedades de separación y purificación se ubican entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa. Las membranas de nanofiltración operan típicamente rechazando eficientemente sales inorgánicas multivalentes (como sulfatos) a presiones modestas (70-150 psi) y con menor consumo de energía en comparación con la ósmosis inversa<sup>7</sup>.

En la Comarca Lagunera es donde más plantas centralizadas se han instalado en México para la remoción de arsénico. De hecho, a partir del 2010 se han instalado varias potabilizadoras a pie de pozo, con el proceso de filtración directa para remover dicho contaminante<sup>3</sup>, para tratar aproximadamente 2,000 L/s en total<sup>6</sup>.

### Tecnologías a escala doméstica

En México diferentes organizaciones sociales han tratado de abordar la problemática social que representa el consumo de agua con arsénico y fluoruro en diferentes comunidades, principalmente rurales.

El grupo EoZ S.A. de C.V., ha promovido filtros comerciales desarrollados con diferentes medios para remoción de arsénico y fluoruro por separado<sup>7</sup>.

La organización Caminos de Agua, ésta desarrollado y probando un sistema de filtración-adsorción de bajo costo, a nivel doméstico, para remover fluoruro en agua de pozo. Además, basados en estudios realizados en diferentes universidades, tienen planes para probar con materiales como carbón de hueso activado y carbón de hueso funcionalizado<sup>8</sup>.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se llevó a cabo la evaluación del funcionamiento hidráulico y la eficiencia de remoción de arsénico de filtros caseros marca TWI (The Water Initiative)<sup>9</sup> que se instalaron en la zona de la Comarca Lagunera del Estado de Durango en el año 2011.

De manera general, la desventaja principal de los sistemas intradomiciliarios es que, si la concentración inicial de los contaminantes en el agua es mayor a la indicada por el fabricante, los medios se saturan antes de lo previsto y el usuario no tiene forma de saber cuándo esto ocurre y por lo tanto no puede programar el mantenimiento del sistema y la adquisición de los repuestos; es decir, existe la incertidumbre del tiempo de vida del medio adsorbente, el cual depende directamente de la cantidad de agua que pasa por el mismo, de la concentración del contaminante y del contenido de otros iones que compiten con el de interés. Otro inconveniente es que normalmente este tipo de sistemas tienden a “taparse” con el tiempo y por lo tanto disminuye el flujo de agua, lo cual tiene como consecuencia que se dejen de usar por resultar imprácticos.

Por otro lado, el fabricante no presenta alternativas para la recolección de los cartuchos usados (saturados con arsénico y fluoruro), ya que se considera que el medio filtrante puede ser desechado al final de su vida útil en rellenos sanitarios sin requerir procedimientos especiales, como compuesto no tóxico.

## Selección de la tecnología de remoción

Aunque existen diversas tecnologías para la remoción de arsénico y fluoruro, sea de forma conjunta o separada, para la elección del proceso es muy importante considerar los aspectos sociales, culturales y económicos de la zona de estudio, ya que son factores relevantes para asegurar la permanencia en el tiempo de cualquier solución implementada. Esto tiene mayor importancia en el caso de comunidades rurales, generalmente aisladas y/o dispersas, con pocos recursos económicos y donde la participación de los habitantes en la toma de decisiones puede ser la diferencia entre el éxito o el fracaso de cualquier proyecto de potabilización.

Desde el punto de vista técnico hay aspectos críticos a considerar, como por ejemplo: la calidad del agua a tratar (concentración del elemento de interés, además de otros que puedan interferir en el sistema de tratamiento); costo de operación y mantenimiento; accesibilidad de los materiales consumibles; requerimientos de mano de obra calificada; disposición final de subproductos o materiales residuales del proceso; y la aceptación por parte de los usuarios.

La tecnología a seleccionar depende de los contaminantes que se desean remover; sin embargo, diferentes tecnologías pueden eliminar el mismo contaminante, razón por la cual es necesario realizar un estudio técnico-económico de las posibles opciones de tratamiento, de preferencia a nivel planta piloto, con pruebas de tratabilidad *in situ*. Dichos ensayos permitirán asegurar la eficiencia de la tecnología y los costos de operación generados por reactivos, energía eléctrica, duración de los materiales utilizados, disposición y manejo de los residuos generados, entre otros.

## Referencias

- <sup>1</sup> Silupú CR, Solís RL, Cruz GJF, Gómez MM, Solís JL, Keisk, RL. Caracterización de filtros comerciales para agua a base de carbón activado para el tratamiento de agua del río Tumbes –Perú. Rev Colomb Quim, 46(3), 37-45 (2017). <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n3.62146>
- <sup>2</sup> Piña-Soberanis M, Calderón-Mólgora CG, González-Herrera A, Martín-Domínguez A. Asistencia técnica para la licitación e instalación de plantas potabilizadoras para remoción de arsénico en Gómez Palacio, Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2011. Clave de proyecto TC 1124.3. Financiado por la Comisión de Agua del Estado de Durango.
- <sup>3</sup> Escobedo-Bretado J, Martín-Domínguez IR, Alarcón-Herrera MT. Simulación y análisis paramétrico de un sistema para destilación solar de agua, basado en humidificación-deshumidificación de aire. Memorias de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar. ANES - ISES. Artículo STS-50, pp.797-803. Guadalajara, Jal. Sep. 28 – Oct. 3 de 2009.
- <sup>4</sup> Olmos-Márquez M, Sáenz-Urbe C, Ochoa-Riveros J, Alarcón-Herrera MT. Potencial de remoción de arsénico del agua de rechazo de sistemas de ósmosis inversa en humedales de Tratamiento. IV Conferencia, Lima, Perú. 2018.
- <sup>5</sup> Villegas-Mendoza IE, Piña-Soberanis M, García-López AJ, Alvillo-Rivera AJ, Linares-Ocampo JJ. Pruebas piloto de procesos de membrana para potabilizar agua salobre de pozo profundo. XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Asociación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Octubre 2018. Guayaquil, Ecuador.
- <sup>6</sup> Garrido-Hoyos SE, Piña-Soberanis M, Martín-Domínguez A. Remoción de arsénico mediante filtración directa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de proyecto TC 1011.3. Financiado por el Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón.
- <sup>7</sup> Sitio web de Grupo EOZ: <https://www.aqualimpia.mx/>
- <sup>8</sup> Sitio web de Caminos de Agua: <https://caminosdeagua.org/>
- <sup>9</sup> Calderón-Mólgora CG, Arroyo-Martínez P, Cruz-Gutiérrez FV, Garrido-Hoyos SE, Gelover-Santiago S, López-Corzo R, Martín-Domínguez A, Pérez-Castrejón S, Quezada-Jiménez ML, Rivera-Huerta ML, Segura-Beltrán N. Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de proyecto TC 0815.3. Financiado por Fondo Metropolitano de la Laguna.

## ESTUDIOS EN LABORATORIO

María Teresa Alarcón Herrera, Alejandra Martín Domínguez, María de Lourdes Rivera Huerta, Sara Pérez Castrejón, Iván Emmanuel Villegas Mendoza, Liliana Reynoso Cuevas, María Aurora Armenta Hernández, Israel Labastida Núñez, Mario Alberto Olmos Márquez y María Cecilia Valles Aragón

En la búsqueda de procesos aplicables a la remoción de arsénico y de fluoruro, ya sea de forma individual o conjunta, existe una gran cantidad de estudios a nivel laboratorio que se pueden encontrar en la literatura. En la mayoría de estos se determina la factibilidad técnica, pero no la económica, ya que esto último requiere pruebas a escala piloto; sin embargo, toda esa información generada es muy valiosa y vale la pena hacer énfasis en los esfuerzos que se han llevado a cabo en México y que han demostrado mayor potencial de aplicación.

### Adsorción en materiales granulares

La adsorción ha sido ampliamente estudiada, utilizando una gran variedad de materiales adsorbentes a nivel laboratorio, tanto para la adsorción de arsénico y fluoruro por separado, como de forma simultánea. En general, las pruebas se realizan para determinar la capacidad de adsorción del medio adsorbente a o diferentes condiciones de pH; posteriormente, se llevan a cabo pruebas a flujo continuo para calcular los tiempos de retención hidráulicos y el tiempo de vida del adsorbente. Una vez agotado (saturado) el adsorbente, se analiza la factibilidad de su regeneración y se calcula el volumen de residuos generados, evaluando sus características, peligrosidad, manejo y disposición.

En la remoción de fluoruro por adsorción, los sorbentes o medios más analizados han sido la alúmina activada y el carbón de hueso; de éstos, el carbón de hueso ha resultado ser el de mayor capacidad de adsorción.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)<sup>1,2</sup> se realizaron pruebas a flujo continuo con columnas a escala laboratorio y semi piloto, utilizando agua de un pozo con una concentración de fluoruro de 3.0 mg/L. En este estudio se determinaron como parámetros críticos el pH y el tiempo de contacto de lecho vacío (TLCV), que es la relación del volumen ocupado por el medio adsorbente (incluidos los espacios) y la velocidad de flujo. En pruebas con las condiciones que optimizan la efectividad de los adsorbentes, se observó que tanto el carbón de hueso (Fija Flúor®) como la alúmina activada de origen comercial (Actiguard Fluorograde), tienen un desempeño similar y pueden tratar aproximadamente 1300 m<sup>3</sup> de agua por m<sup>3</sup> de sorbente, logrando llevar la concentración de fluoruro por debajo del límite máximo permitido por la NOM 127 (1.5 mg/L). Ambos medios pudieron ser regenerados con hidróxido de sodio en solución, al 4% para carbón de hueso y al 2% para la alúmina activada. Se determinó también que el carbón de hueso pierde el 30% de su capacidad de adsorción y la alúmina activada el 25%, ambos después de cinco ciclos de servicio-regeneración<sup>2</sup>.

La adsorción es un proceso muy sencillo de operar, pero hasta la fecha, no se han logrado desarrollar en el país materiales adsorbentes que le permitan posicionarse como la mejor opción desde el punto de vista de viabilidad económica para la remoción de estos contaminantes, sobre todo cuando se requiere aplicar en sistemas centralizados. Para sistemas intra-domiciliarios

(caseros) en zonas rurales o sin sistemas formales de abastecimiento, la adsorción sigue siendo la mejor opción, aunque no la más económica.

## Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es una tecnología prometedora para remover de forma individual y simultánea arsénico y fluoruro del agua para consumo humano. Básicamente consiste en aplicar una corriente directa entre dos o más electrodos de sacrificio, los cuales se sumergen en la solución a tratar y liberan iones metálicos que forman hidróxidos que desestabilizan y adsorben a las especies contaminantes<sup>3</sup>. Comparada con la coagulación convencional que utiliza coagulantes químicos, esta tecnología presenta las ventajas de no incrementar la cantidad de sólidos disueltos en el agua tratada, además de producir arriba de un 21% menos de volumen de residuos (lodos) durante el tratamiento<sup>4</sup>.

Pruebas realizadas en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV)-Durango con un reactor electroquímico de 1.5 L de capacidad, equipado con cuatro electrodos de hierro y aluminio de 17.5 cm x 12.5 cm, utilizados para la remoción de ambos contaminantes, muestran que el arsénico es removido con mucho mayor rapidez que el fluoruro<sup>5</sup>. Los resultados obtenidos al tratar agua con fluoruro a una concentración inicial máxima de 5 mg/L y un contenido de arsénico de  $^{80}$   $\mu\text{g/L}$ , bajo condiciones optimizadas que incluyen un pH inicial igual a 5 y un tiempo de retención de 15 min, se obtuvo el 97% de remoción de arsénico ( $C_r = 2.27 \mu\text{g/L}$ ) y 85.7% de remoción de fluoruro ( $C_r = 0.716 \text{ mg/L}$ ), concentraciones finales menores a 0.025 mgAs/L y 1.5 mgF/L de acuerdo a la modificada NOM 127.

La EC ha sido estudiada por una gran cantidad de grupos de trabajo en México y en otras partes del mundo para remover una infinidad de contaminantes, sin embargo, su aplicación a gran escala y a flujo continuo se enfrenta a problemas de tipo tecnológico y económico. El diseño de un reactor a escala industrial no es sencillo, porque de forma integral debe atender cuestiones electroquímicas e hidrodinámicas que consigan sistemas de tratamiento estables, eficientes y de bajo costo en la construcción y operación, para hacerlo competitivo con tecnologías como la filtración en línea o por membranas. Uno de los inconvenientes que se presentan en la electrocoagulación es la pasivación, ésta ocurre cuando sobre la superficie de los electrodos se forma una capa de óxidos que disminuye la eficiencia de producción del coagulante e incrementa la resistencia de la celda, por lo tanto, el consumo de energía y el costo de tratamiento se elevan. Una de las formas de operación más utilizadas para evitar la pasivación y desgastar homogéneamente los electrodos, es haciendo el cambio de polaridad de los electrodos periódicamente, lo que se le denomina corriente pulsada (ECP). Otra de las dificultades del proceso son las pequeñas cantidades de gas hidrógeno que se produce simultáneamente con el coagulante en la celda de reacción. Si el agua electrocoagulada no se desgasifica, se corre el riesgo de que el gas se acumule y ocasione perturbaciones o presurización en los equipos, afectando la eficiencia y estabilidad del tratamiento<sup>4</sup>.

Los costos de tratamiento por electrocoagulación estimados en el IMTA (sin considerar equipo), para concentraciones iniciales de arsénico en agua de 0.2 mg/L, son del orden de \$2.02/m<sup>3</sup>, disminuyendo a \$1.8/m<sup>3</sup> cuando se considera ECP<sup>6</sup>. Es recomendable realizar pruebas a escala piloto en sitio, para validar el proceso de electrocoagulación empleando corriente pulsada en lugares en los que el agua presente una concentración mayor o igual a 0.2 mg/L ya que este tipo de tecnología requiere todavía más estudios para disminuir sus costos y ser competitiva con las tecnologías de los sistemas de membranas.

## Nanomateriales

Las propiedades de las partículas nanométricas, así como la química de su superficie y su influencia en la cinética de reacciones, son campos de estudio que se están enfocando a nivel internacional para el control de la contaminación del agua. Si bien a la fecha, debido a su tamaño y propiedades, es complicado el llevarlas a nivel de procesos de tratamiento, han sido propuestas para incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes *in situ*. Por esta razón, los estudios de los nanomateriales, como la fijación de las nano partículas sobre membranas de nano y ultrafiltración, el dopado de diferentes materiales como las zeolitas, los nano-sorbentes como los óxidos de hierro y composites de aluminio fijos en diferentes materiales soporte<sup>7</sup>, son un tema de desarrollo científico y tecnológico en el tratamiento de agua.

Los nanomateriales han despertado gran interés por su capacidad de remover arsénico, entre otros contaminantes, de soluciones acuosas. En estudios realizados en CIMAV-Durango<sup>5</sup>, que incluyó la síntesis de cuatro nanopartículas ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{HFeO}_2$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) por coprecipitación de una disolución de sales de hierro, mediante el método (adaptado) propuesto por Massart<sup>8</sup>, se evaluó la eficiencia de remoción de arsénico ( $\text{As}^{3+}$ ) en agua para consumo humano. En la Figura 4.1 se muestran los resultados obtenidos partiendo de agua con 45  $\mu\text{g/L}$  de arsénico, obteniéndose una concentración final debajo del límite máximo permisible sugerido por la OMS (10  $\mu\text{g/L}$ ) a los 10 min de contacto con estos materiales.

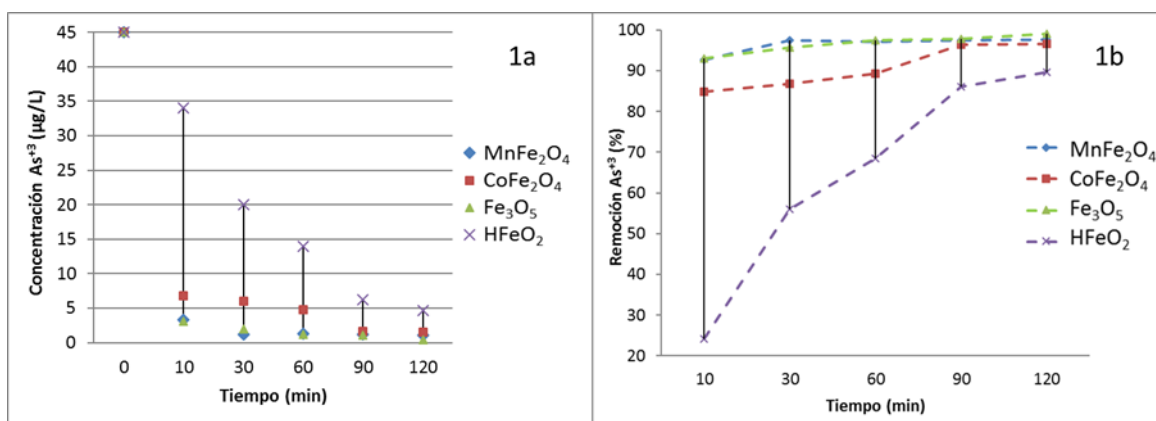


Figura 4.1. a) Concentración final de  $\text{As}^{3+}$  y b) Remoción de  $\text{As}^{3+}$ , a diferentes tiempos de contacto con las cuatro nanopartículas sintetizadas.

La aplicación de los nanomateriales tiene potencial de ser una alternativa en el tratamiento de agua contaminada con arsénico, ofreciendo en teoría diferentes ventajas con respecto a los materiales convencionales, como tiempos de proceso cortos, baja generación de residuos, posibilidad de recuperación del material adsorbente, entre otros. Sin embargo, aún falta mucho trabajo por realizar para determinar, primero a escala piloto, la factibilidad técnica de su aplicación.

## Destilación Solar

La falta de agua dulce para consumo humano frecuentemente coincide con la abundancia de energía solar, como es el caso de zonas áridas; por lo tanto, en zonas donde este tipo de energía es abundante, su uso para la operación de sistemas de tratamiento de agua resulta atractivo.

Una tecnología emergente para la remoción de contaminantes disueltos en agua que aprovecha la energía del sol es la destilación solar (DS), proceso que ha sido empleado principalmente en aplicaciones de desalinización. Este proceso se basa en un cambio de fase

del agua que permite la separación de sales, microorganismos y otros materiales; el vapor de agua puro se condensa para después ser recolectado libre de impurezas.

En el CIMAV-Durango se lleva a cabo una investigación a nivel laboratorio con destilación solar para la remoción de varios contaminantes, incluyendo arsénico y fluoruro, en comunidades rurales. El sistema de destilación por evaporación a baja temperatura fue simulado en TRNSYS y de acuerdo con los resultados preliminares, la variable más importante del proceso es la temperatura de entrada del agua<sup>9</sup>. A la fecha el prototipo para pruebas experimentales de destilación solar aplicada a la remoción de arsénico y fluoruro del agua para consumo humano, se encuentra en la fase de construcción.

### Membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para remover arsénico

Actualmente el proceso de filtración por membranas que se utiliza principalmente para remover arsénico es la ósmosis inversa. Esto se debe a que este proceso ofrece una gran capacidad para remover contaminantes disueltos en el agua, sin embargo, tiene principalmente tres desventajas: 1) elevado consumo de energía (que incide en el costo de operación), 2) elevado costo de inversión y 3) necesidad de remineralizar el agua producto debido a que usualmente se obtiene agua sin sales minerales, lo que provoca problemas de corrosión en la red de suministro y problemas a la salud humana. Debido a la necesidad de estudiar otras tecnologías de filtración por membranas para remover arsénico que puedan ser implementadas en México, en el IMTA se estudiaron diversas membranas de nanofiltración y se compararon con ósmosis inversa para conocer si era factible reemplazar esta última para disminuir los costos de inversión y operación<sup>10, 11</sup>.

Se evaluó la capacidad de remoción de arsénico de dos membranas comerciales de nanofiltración y una de ósmosis inversa a escala laboratorio. El objetivo fue estudiar membranas con diferente capacidad nominal de rechazo de sales, presión de trabajo y consumo de energía, a fin de elegir la o las membranas con potencial de remoción de arsénico, para posteriormente evaluarlas a nivel piloto (1 L/s).

**La tabla 4.1** Modelos de membrana sujetos a estudio y su rechazo nominal de sales correspondiente.

| Tipo de membrana | Modelo | Rechazo nominal de sales (NaCl) |
|------------------|--------|---------------------------------|
| Ósmosis inversa  | CPA-5  | 99.7 %                          |
| Nanofiltración   | NF90   | 90-96 %                         |
| Nanofiltración   | NF270  | 50 %                            |

Para realizar el estudio se utilizó un banco de pruebas del IMTA, el cual está equipado con una bomba de alta presión y un variador de frecuencia que permite operar membranas de nanofiltración o de ósmosis inversa (Imagen 4.1). El equipo permite probar una sola membrana a la vez y es alimentado por una cisterna de 10 m<sup>3</sup> de capacidad. La recuperación de agua producto fue del 15%, mientras que el agua de rechazo (deshecho) fue del 85%, partiendo de agua sintética que contenía 0.2 mg/L de arsénico.



Imagen 4.1. Banco de pruebas de membranas.

Las tres membranas evaluadas presentaron un elevado rechazo de arsénico, 100% para la membrana de ósmosis inversa y 99.99% para ambas membranas de nanofiltración, por lo tanto las tres membranas eran factibles de evaluarse a escala piloto. Este tipo de plantas operan utilizando arreglos de membranas que les permiten operar con niveles recuperación de agua producto  $\geq 70\%$ , con la finalidad de minimizar costos y rechazar la menor cantidad de agua posible. En los procesos de membrana el factor de recuperación de agua producto está directamente relacionado con la calidad deseada; un nivel de recuperación bajo permite obtener una mayor capacidad de rechazo de iones, es decir, una mayor remoción de contaminantes disueltos.

### Materiales geológicos como adsorbentes naturales

La remediación *in-situ* ha sido estudiada a nivel internacional como un medio eficiente para la retención de contaminantes directamente en acuíferos someros. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentra el uso de barreras reactivas permeables (BRP), particularmente para la retención de arsénico y fluoruro de aguas subterráneas someras.

Las BRP se colocan de manera transversal al flujo de agua subterránea, en su conformación se pueden incluir materiales geológicos naturales que, mediante distintas reacciones geoquímicas, adsorben o transforman los contaminantes que la atraviesan<sup>12</sup>.

Existen diversos materiales geológicos que pueden utilizarse dentro de las BRP, por ejemplo la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) por su capacidad para remover diversos aniones. Este mineral constituye aproximadamente el 50% de las rocas calizas, cuya presencia es común en numerosos estados del país<sup>13</sup>. En México destacan los estudios de adsorción realizados con calizas del área de Zimapán, para tratar soluciones sintéticas con concentraciones de arsénico de hasta 4.22 mg/L, logrando alcanzar remociones entre el 75 y el 83%, a pH entre 7 y 8<sup>14</sup>. Los principales mecanismos de remoción involucrados en estos tratamientos son la adsorción o la sustitución isomórfica del arseniato por carbonato dentro de la estructura de la calcita<sup>15</sup>. Estas mismas rocas fueron utilizadas para tratar soluciones con 3 mg/L de fluoruro, los resultados mostraron concentraciones finales de 1.05 mg/L, valor que cumple con el límite de la normatividad nacional de 1.5 mg/L<sup>16</sup>. En este caso el mecanismo de remoción involucrado es la adsorción del fluoruro en la calcita contenida en la caliza y a partir de concentraciones de fluoruro de 10 mg/L se propone la formación de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) debido a la interacción agua-roca y la consecuente liberación de iones calcio que precipitan a los iones fluoruro. Los resultados muestran que estas rocas, por su capacidad de adsorción, son factibles para utilizarse dentro de BRP o incluso se han propuesto como medio sorbente para alternativas de tratamiento casero en la remoción de arsénico y/o fluoruro, ya sea en lote o en columnas<sup>16,17,18</sup>. Por ejemplo, en el estudio realizado por Flores y colaboradores<sup>17</sup>, se utilizaron columnas empacadas con roca caliza para tratar agua subterránea con 0.456 mg/L de arsénico, al finalizar el tratamiento se obtuvieron concentraciones debajo de lo establecido por la normatividad nacional (0.025 mg/L).

Otras de las alternativas en la remoción de aniones es el uso de zeolitas, mineral abundante en algunos estados del país<sup>19</sup>. Se ha comprobado que la zeolita natural procedente de San Luis Potosí es capaz de remover aniones como el fluoruro<sup>20</sup> y su potencial de remoción puede incrementarse si son modificadas con iones calcio provenientes de la disolución de rocas calizas al contacto con el agua. En el estudio realizado por Labastida y colaboradores<sup>20</sup> se trataron soluciones con concentraciones de fluoruros entre 1.5 y 15 mg/L, los resultados experimentales mostraron valores de 0.6 y de 8.55 mg/L respectivamente, logrando eficiencias de remoción del 60 y el 43% respectivamente.

Aproximadamente el costo de las zeolitas, particularmente del tipo clinoptilolita, oscila los 4\$/kg, mientras que los costos de la roca caliza aproximados son de 0.35\$/kg. Ambos materiales, por su origen natural y abundancia en el territorio nacional, podrían combinarse para ser utilizados como material reactivo en una BRP, para el tratamiento de preventivo de acuíferos someros o bien, analizando como posibles filtros caseros como se mencionó anteriormente.

### Fito-tecnologías en la remoción de arsénico

La fitorremediación ha sido propuesta como una tecnología alternativa amigable y costo-efectiva para remediar suelos y agua contaminados con diferentes contaminantes, orgánicos e inorgánicos. Dicha técnica ha sido aplicada en la remoción de diferentes contaminantes (incluyendo metales y metaloides) de suelo, agua superficial, agua subterránea y aguas residuales municipales e industriales. El arsénico se puede remover del agua con plantas a través de la fitoextracción usando plantas hiperacumuladoras, o puede ser filtrado y adsorbido por las raíces a través de la rizofiltración utilizando plantas fitoestabilizadoras. En el CIMAV, se ha llevado a cabo investigación para determinar la factibilidad de diferentes especies de plantas en la absorción del contaminante tanto a nivel laboratorio como a nivel invernadero a través de prototipos de “Humedales Construidos”, también conocidos como “Humedales Artificiales” o de Tratamiento. Como resultados del trabajo de campo se tuvo la identificación taxonómica y determinación analítica de arsénico en más de 40 especies de plantas en sitios mineros y cuerpos de agua superficial con concentraciones altas de arsénico. En base a dichos estudios, se determinó que *Eleocharis macrostachya*, y *Schoenoplectus americanus*, tienen un alto potencial de absorción y translocación del arsénico del agua a la raíz y parte aérea de las plantas<sup>22</sup>. En estudios posteriores se determinó la absorción de arsénico por ambas plantas en un prototipo de humedal artificial, operando en flujo subsuperficial. Los experimentos se llevaron a cabo en prototipos de humedales construidos. Uno plantado con *E. macrostachya* y el otro plantado con *S. americanus* y un tercero sin plantar. Las muestras de agua fueron tomadas a la entrada y salida de los humedales durante 343 días de prueba. Al final del experimento, las plantas y el suelo de cada prototipo se dividieron en tres segmentos iguales (entrada, medio y salida) y se analizaron para determinar el contenido de arsénico retenido en el sistema. Los resultados revelaron que fue posible remover el arsénico del agua durante el tiempo de prueba, partiendo de una concentración inicial de arsénico de 0.100 mg/L y manteniéndose siempre debajo de los 0.025 mg/L a la salida. Los humedales plantados mostraron una capacidad de retención de arsénico 50% superior a las unidades no plantadas. Con dicha experimentación, se demostró que la separación de arsénico del agua con humedales construidos es un proceso tecnológico factible. Sin embargo, es necesario enfatizar que la validez de operación del sistema variará en función del medio poroso, la planta, las características del agua y el sistema de operación con el que se trabaje.

### Referencias

- 1 Rivera-Huerta ML, Martín-Domínguez A, Mundo-Ávila E, Cuevas-Burgos A, Treviño-Resendez JJ, Gutiérrez-Sancha EM. Análisis Técnico y Económico de Tecnologías para remoción de Fluoruros. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2011). Clave del proyecto TC1108.1. Financiado por el IMTA.
- 2 Rivera-Huerta ML, Cortés-Muñoz JE, Martín-Domínguez A, Calderón-Mólgora CG, Montellano-Palacios L, Pérez-Castrejón S, Almazán-García F, Gómez-Rojas A, Linares-Ocampo JJ. Análisis Técnico y Económico de Tecnologías para remoción de Fluoruros 2ª parte y evaluación de riesgos a la salud por exposición a fluoruros presentes en agua. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2012). Clave del proyecto TC1203.1. Financiado por el IMTA.
- 3 Mondal S, Mihir Kumar Purkait M. De S. Electrocoagulation. In *Advances in Dye Removal Technologies, Green Chemistry and Sustainable Technology* 289–312, (2018) <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6293-3>
- 4 Almazán-García F, Rivera-Huerta ML, Martín-Domínguez A. Comparación entre la coagulación convencional y la electrocoagulación en la remoción de fluoruros de agua para consumo humano. *Revista Tecnología Ciencia Educación (IMIQC)*. 27 (2):101-110 (2012).
- 5 Reynoso-Cuevas L, Morales-Amaya C, Alarcón-Herrera MT. Potencial de remoción de arsénico y flúor por electrocoagulación. México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados. 2018. Financiado por el CIMAV-Dgo.
- 6 Pérez-Castrejón S, Gelover-Santiago SL, González-Herrera A, Martín-Domínguez A, Ordoñez-Ferrusco A, Piña-Soberanis M, Rivera-Huerta ML, Sandoval-Villasana AM, Villegas-Mendoza IE, Aceves-Zamudio D, De La Cruz-Martínez D, Gómez-Rojas A, Martínez-De Jesús A, Montes-Brito A, Ramírez-Ruiz C, Rodríguez B, Toledo-Flores LS, Velasco-Montero J. Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico, Tercera etapa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2016. Clave del proyecto TC1603.1. Financiado por el IMTA.
- 7 Alarcón-Herrera MT, Martín-Domínguez A, Reynoso-Cuevas L, Piña-Soberanis M, González-Herrera A. Arsenic in drinking water: Current situation and technological alternatives for removal. González E, Forero E. *Bio-Nanotechnology for Sustainable Environmental Remediation and Energy Generation, Bio-Nano Convergence Network*. Colombia. DISONEX; 2016. 39-64.
- 8 Bee, A, Massart, R, Neveu, S. Synthesis of very fine maghemite particles. *Journal of Magnetism and magnetic materials*, 149(1-2):6-9 (1995). [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(95\)00317-7](https://doi.org/10.1016/0304-8853(95)00317-7)
- 9 Escobedo-Bretado J, Martín-Domínguez IR, Alarcón-Herrera MT. Simulación y análisis paramétrico de un sistema para destilación solar de agua, basado en humidificación-deshumidificación de aire. *Memorias de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar. ANES - ISES. Artículo STS-50*, pp.797-803. Guadalajara, Jal. Sep. 28 – Oct. 3 de 2009.
- 10 González-Herrera A, García-López AJ, Villegas-Mendoza IE, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Coahuila. Etapa 2016. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2018. Clave de proyecto TC1632.3. Financiado por CONAGUA.
- 11 Villegas-Mendoza IE, Sandoval-Villasana AM, Pérez-Castrejón S, Gelover-Santiago SL, Cortes- Muñoz JE. Estrategia para la potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Mor., con un enfoque holístico. Segunda etapa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2015). Clave del proyecto TC1503.1. Financiado por el IMTA.
- 12 Blowes DW, Ptacek CJ, Benner SG, McRae CW, Bennett TA, Puls RW. Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers. *J Contam Hydrol*, 45(1–2), 123–137 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(00\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(00)00122-4)
- 13 Coordinación General de Minería. Perfil de Mercado de IA. Dirección General de Desarrollo Minero, (2014). Extraído de: [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5566/pm\\_caliza\\_2014.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5566/pm_caliza_2014.pdf)
- 14 Romero FM, Armienta MA, Carrillo-Chávez A. Arsenic sorption by carbonate-rich aquifer material, a control on arsenic mobility at Zimapán, Mexico. *Arch Environ Contam Tox*, 47(1), 1-13 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00244-004-3009-1>
- 15 Alexandratos VG, Elzinga EJ, Reeder RJ. Arsenate uptake by calcite: Macroscopic and spectroscopic characterization of adsorption and incorporation mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(17), 4172–4187 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.06.055>
- 16 Labastida I, Armienta MA, Beltrán M, Caballero G, Romero P, Rosales MA. Limestone as a sustainable remediation option for water contaminated with fluoride. *J Geochem Exploration*, 183, 206–213 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.12.001>
- 17 Flores E, Armienta MA, Micete S, Valladares MR. Tratamiento de agua para consumo humano con alto contenido de arsénico: estudio de un caso en Zimapán Hidalgo-México. *Información Tecnológica*, 20(4), 85–93. (2009). <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4098it.08>
- 18 Ongley LK, Armienta MA, Heggeman K, Lathrop AS, Mango H, Miller W, Pickelner S. Arsenic removal from contaminated water by the Soyatal Formation, Zimapán Mining District, Mexico – a potential low-cost low-tech remediation system. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1(1), 23–31. (2001). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1144/geochem.1.1.23>
- 19 Ostroumov FM, Ortiz LE, Corona CP. Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. *Sociedad Mexicana de Mineralogía*, 1–9 (2003).
- 20 Labastida NI, Velasco PM, Álvarez DK. Clinoptilolite modified by calcium and hydroxyl ions for removal of fluoride from aqueous solution. *IOP Conf.Series:J. Phys Conf.Ser* 122, 012064 (2019).
- 21 Núñez Montoya OG, Alarcón Herrera MT, Melgoza Castillo A, Rodríguez Almeida FA, Royo Márquez MH. Evaluación de tres especies nativas del desierto Chihuahuense para uso en fitoremediación. *Revista Terra*, 25:35-41, (2007).
- 22 Olmos-Márquez MA, Alarcón-Herrera MT, Martín Domínguez IR. Performance of Eleocharis Macrostachya and its importance for arsenic retention in constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Pollution Research* (2012). Springer-Verlag Vol 19 No. 3, 763-771, DOI: 10.1007/s11356-011-0598-x

## ESTUDIOS PILOTO PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Alejandra Martín Domínguez e Iván Emmanuel Villegas Mendoza

En México existe poca cultura para llevar a cabo pruebas en planta piloto previo a la selección de tecnología para resolver problemas específicos en el tratamiento o la potabilización del agua. Sin embargo, esta práctica permitiría tener la seguridad de que la inversión que se va a llevar a cabo esté bien empleada, además de conseguir información precisa de los costos de operación y mantenimiento, así como de la facilidad o dificultades de operación del sistema.

### Cuando el problema es sólo arsénico

Con ese objetivo, en el 2010 el Fondo Metropolitano de la Laguna<sup>1</sup> encomendó al IMTA la realización de un estudio comparativo, a escala piloto, de tecnologías comúnmente utilizadas para remoción de arsénico: nanofiltración, microfiltración, coagulación-floculación convencional, electrocoagulación, adsorción en medios específicos (sorb 33, G2R y ADSORBSIA) y deionización capacitiva (Imagen 4.2).



Adsorción



Coagulación convencional



Electrocoagulación



Deionización Capacitiva



Coagulación/microfiltración



Nanofiltración

**Imágenes 4.2.** Plantas piloto utilizadas para seleccionar la tecnología más adecuada para remover arsénico en la Comarca Lagunera.

En coordinación con los cinco organismos operadores de agua potable que abastecen a la zona metropolitana (SIMAS, SIDEAPA, SAPAL, SIAPA y SIMAS Rural), se propusieron distintos pozos en los que se sabe contienen arsénico disuelto en concentraciones superiores a 25 µg/L y se seleccionaron el 32R en Torreón, Coahuila y el 13 en la comunidad de San Felipe, Gómez Palacio, Durango.

Todas las tecnologías probadas resultaron ser efectivas en la remoción del metaloide; sin embargo, debido a que la deionización capacitiva no puede tratar caudales mayores a 1 L/s, no es factible instalarla para tratar el agua que se distribuye en la red, su uso se debe enfocar hacia aplicaciones más pequeñas como es el embotellado de agua y puede ser útil en comunidades rurales. Las otras cinco tecnologías son aptas para tratar la totalidad del agua producida por los pozos con problemas de arsénico, todas ellas pueden producir efluentes con concentraciones menores a 10 µg/L (0.01 mg/L) de este contaminante.

Los lodos de desechos que generan la coagulación convencional, la electrocoagulación y la microfiltración son considerados no peligrosos, el análisis CRETl efectuado a los lodos generados en las pruebas en campo, arrojó como resultado que cumplen con lo establecido en el numeral 5.1.1 de la NOM-053-SEMARNAT-1993; por lo anterior pueden ser dispuestos en un relleno sanitario.

La salmuera de la nanofiltración tampoco rebasa los límites de concentración de arsénico en el agua de rechazo (0.5 mg As/L) para descarga en el alcantarillado (NOM-002-SEMARNAT-1996), por lo que puede ser vertida al alcantarillado municipal.

Independientemente de los costos de inversión y operación, cada una de las tecnologías presenta ventajas y desventajas: a) la coagulación convencional y la electrocoagulación demandan mucha mano de obra, ya que, aun automatizando las plantas, es necesario tener al menos un operador de tiempo completo por turno en éstas; en las otras tecnologías el operador puede atender a más de una planta si se cuenta con un vehículo de soporte y la instrumentación necesaria; b) Con relación a la cantidad de agua que se desperdicia por el tratamiento, la nanofiltración puede llegar hasta el 25% del caudal tratado, mientras que las otras no rebasan el 5%; c) Las dos que más espacio requieren son la coagulación convencional y la electrocoagulación, siendo 1.4 veces más grandes en tamaño aproximadamente que las dos tecnologías de membranas (micro y nanofiltración) y hasta 1.8 veces que la adsorción; d) Todas las tecnologías analizadas pueden también remover fluoruro, con sus adecuaciones pertinentes, sin embargo, en la zona de estudio no existía ese parámetro fuera de norma, por lo tanto, no se analizaron con ese objetivo.

El análisis económico se realizó considerando un tiempo de vida útil de 20 años sobre la base de una planta potabilizadora de 30 L/s. Los costos de operación se calcularon con parámetros medidos en campo durante las pruebas de tratabilidad, para el costo de energía eléctrica se utilizó la tarifa 6 de la Comisión Federal de Electricidad publicada para el 2010, y como la tarifa varía mes con mes, se tomó el promedio aritmético anual. En el caso de los procesos de membrana, los costos de sustitución de membranas se repartieron de manera uniforme cada año.

Los resultados, con datos del 2010, mostraron que la microfiltración, con un costo de casi 8 millones de pesos mexicanos, resultó ser hasta 1.4 veces más cara que la nanofiltración; 1.5 más que la electrocoagulación, 1.7 más que la coagulación convencional y 2.4 más que la adsorción. Por otro lado, la tecnología con el mayor costo de operación para remover el arsénico fue la adsorción (3.25 \$/m<sup>3</sup>), la cual resultó 1.14 veces por arriba que la nanofiltración, 1.55 que la electrocoagulación, 2.13 que la coagulación convencional y 2.8 veces que la microfiltración. En resumen, la microfiltración presentó los mayores costos de inversión y la adsorción los menores, sin embargo, la tecnología más cara para remover el arsénico es la adsorción y la más económica la microfiltración.

Para comparar las tecnologías el estudio se basó en el criterio del Valor Actual Neto Social (VANS) y en el beneficio costo. Para determinar cuál de las alternativas propuestas resultaba más conveniente se trasladaron a VANS todas ellas y se consideró una tasa de actualización del 12%. El estudio concluye que, de las tecnologías analizadas, la coagulación convencional es la que presenta el mayor beneficio/costo y el mejor VANS, seguida por la microfiltración y después por electrocoagulación, nanofiltración y adsorción. Las dos primeras opciones tecnológicas están en un intervalo semejante de relación beneficio costo y VANS.

Es importante señalar que no hay una solución única, ya que no en todos los predios en que se ubican los pozos con problemas de arsénico hay espacio disponible. La tecnología a adoptar debe acoplarse a cada situación: si hay espacio suficiente y se tiene la seguridad de contar con operadores capacitados, se debe optar por la de coagulación convencional; si el terreno disponible o la disponibilidad de mano de obra son factores limitantes, la microfiltración y la adsorción en medios específicos son soluciones atractivas. En los pozos en que el agua, además de arsénico, presenta alta dureza y/o conductividad, la nanofiltración es a considerar.

*Cuando existen otros iones fuera de la normatividad*

Para profundizar en esta última problemática, en un estudio posterior<sup>2</sup> se evaluó la factibilidad técnica y económica de potabilizar agua de un pozo profundo ubicado en Torreón, Coahuila, el cual estaba contaminado con arsénico y otros contaminantes disueltos.

La concentración de arsénico en el agua fue de 0.082 mg/L, valor superior al límite máximo permisible que establece la normatividad mexicana (0.025 mg/L), la OMS y la Agencia de Protección Ambiental de USA (USEPA) (0.01 mg/L). Los otros contaminantes disueltos cuyas concentraciones también excedieron los límites establecidos en la legislación mexicana fueron: sulfatos (1,781 mg/L), dureza total (1,574 mg/L), sólidos disueltos totales (1,937 mg/L) y sodio (218 mg/L).

Para realizar el estudio se utilizó un equipo piloto de filtración por membranas diseñado y armado por el IMTA (Imagen 4.3), que puede operar a un caudal de 15.85 GPM (1 L/s) utilizando membranas de nanofiltración o de ósmosis inversa. El equipo utiliza 18 membranas de 4" de diámetro por 18" de longitud que se colocan dentro de seis vasijas de alta presión (tres membranas en cada vasija). El arreglo de membranas (2:2:1:1) permite obtener factores de recuperación  $\geq 70\%$ , que corresponde a los niveles típicos de operación de sistemas a gran escala.

Se evaluaron membranas con diferente capacidad nominal de rechazo de sales, presión de trabajo y consumo de energía. La tabla 4.2 muestra los modelos de membrana sujetos a estudio y su rechazo nominal de sales correspondiente.

**Tabla 4.2.** Modelos de membrana y rechazo nominal de sales

| Tipo de membrana | Modelo | Rechazo nominal de sales (NaCl) |
|------------------|--------|---------------------------------|
| Ósmosis inversa  | CPA-5  | 99.7 %                          |
| Nanofiltración   | NF90   | 90-96 %                         |
| Nanofiltración   | NF270  | 50 %                            |



Imagen 4.3. Planta piloto de filtración por membranas

Los resultados indican que la membrana más adecuada para llevar a cabo el proceso de potabilización de agua de pozo profundo sujeta a estudio, fue la de nanofiltración, con bajo nivel de rechazo nominal de sales (50%) NF270. El uso de esta membrana permitió remover en su totalidad el arsénico y disminuir las concentraciones de los otros contaminantes disueltos presentes (sulfatos, dureza total, sólidos disueltos totales y sodio) a valores que se encuentran dentro de los límites establecidos por la legislación mexicana, la OMS y la USEPA. El agua tratada no requirió ser remineralizada químicamente para evitar problemas de corrosión o a la salud humana, ya que contenía la concentración de sales minerales necesaria para ser químicamente estable.

La tabla 4.3 muestra la presión de alimentación y el consumo de energía requerido al utilizar las diferentes membranas, aspecto que tiene mucho que ver con el costo de operación. La membrana de ósmosis inversa (CPA5) requirió más del doble de presión que requiere la membrana NF-270 y un 70% más energía. La membrana de nanofiltración NF-90 se mantuvo en un rango intermedio.

Tabla 4.3. Presión requerida y consumo de energía

| Membrana | Presión de alimentación (psi) | Consumo de energía (kW-h) |
|----------|-------------------------------|---------------------------|
| CPA-5    | 150                           | 4.1                       |
| NF-90    | 90                            | 3.25                      |
| NF-270   | 70                            | 2.4                       |

El costo de operación y mantenimiento, que considera los costos por consumo de energía eléctrica, más los reactivos químicos y refacciones requeridos, fue de 0.36, 0.34 y 0.29 USD/m<sup>3</sup> para las membranas CPA5, NF- 90 y NF-270, respectivamente, siendo la membrana NF-270 la de menor costo para potabilizar el agua analizada.

### Estudios complementarios

Es muy recomendable que las pruebas piloto en sitio se acompañen de estudios que midan la percepción de la población sobre el servicio y la calidad de agua que reciben, esto porque, generalmente, la falta de aplicación de la tecnología tiene mucho que ver con los pocos recursos económicos con los que disponen los organismos operadores, ya sea por el bajo nivel de recaudación que predomina en el país, o por las bajas tarifas económicas y/o por la desviación de recursos hacia

otras prioridades, esto último propiciado por la falta de conocimiento y por lo tanto la poca exigencia que tiene la población para que se les proporcione agua apta para su consumo.

En la Comarca Lagunera<sup>1</sup> se diseñó y aplicó una encuesta en la que se abordaban los siguientes aspectos: Percepción de los efectos de la calidad del agua en el estado de salud general; Origen del agua para beber y para preparación de alimentos; Credibilidad del sistema de abastecimiento de agua; y Capacidad y voluntad de pago para contar con un suministro de agua libre de arsénico. La población total de los cuatro municipios de la Comarca Lagunera incluidos en el estudio fue de 1,110,890; el tamaño de muestra para un nivel de confianza del 95%, con un error estadístico del 3.1%, es de 1,000 habitantes, pero considerando que en las comunidades más pequeñas se aplicaron cuatro cuestionarios y quitando los datos detectados con inconsistencias, el tamaño de la muestra final fue de 1,081.

Algunos datos relevantes aportados por la encuesta fueron:

- La cantidad y la oportunidad del servicio de agua son el factor más importante para el 83% de la población, sólo el 17% de los encuestados considera más importante la calidad del agua.
- El 43% de la población está consciente de la presencia de arsénico en el agua de la región.
- Aproximadamente el 53% de la población encuestada consume agua de garrafón para beber ya sea como única opción o en combinación con agua de la llave.
- En promedio los hogares pagaban \$107.10 pesos al mes por el servicio de agua y en los hogares en los que consumía agua de garrafón tenían una erogación mensual de \$181.00, cerca del 41% de ese costo era por garrafones.
- El 91 % de la población que consumía agua de garrafón (48% de los encuestados) estaría dispuesto a transferir ese pago hacia el sistema municipal de agua, si tuviera la garantía que el agua de suministro tiene la calidad requerida para beber.

## Referencias

- <sup>1</sup> Calderón-Mólgora CG, Arroyo-Martínez P, Cruz-Gutiérrez FV, Garrido-Hoyos SE, Gelover-Santiago S, López-Corzo R, Martín-Domínguez A, Pérez-Castrejón S, Quezada-Jiménez ML, Rivera-Huerta ML, Segura-Beltrán N. Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de proyecto TC 0815.3. Financiado por Fondo Metropolitano de la Laguna.
- <sup>2</sup> Villegas-Mendoza IE, Piña-Soberanis M, García-López AJ, Alvillo-Rivera AJ, Linares-Ocampo JJ. Pruebas piloto de procesos de membrana para potabilizar agua salobre de pozo profundo. XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Asociación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Octubre 2018. Guayaquil, Ecuador.

## PLANTAS CENTRALIZADAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Antonio Javier García López, Arturo González Herrera, Iván  
Emmanuel Villegas Mendoza y Martín Piña Soberanis

En México no existe un número oficial de plantas centralizadas para la remoción de arsénico y fluoruro. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) es la institución que más experiencia tiene en pruebas de tratabilidad a nivel piloto, para la instalación de plantas centralizadas y a pie de pozo. De las experiencias en ello se tiene que, prácticamente todas las tecnologías que han sido probadas satisfactoriamente para remover arsénico (excepto la deionización capacitiva), pueden implementarse a nivel centralizado, es decir, a pie de pozo o en la conjunción de varios pozos. Es importante señalar que siempre será más barato construir y operar una sola planta potabilizadora, que varias, sin mencionar que el seguimiento a la calidad del agua también es más fácil y consume menos recursos. Sin embargo, la centralización del tratamiento dependerá de la infraestructura de distribución existente o factible de instalar, de su estado físico y de su perspectiva de crecimiento y sectorización.

De las tecnologías para remoción de arsénico evaluadas en el 2010 por el IMTA<sup>1</sup>, considerando eficiencia, complejidad, costos de inversión y operación, la más favorable resultó ser la coagulación convencional, sin embargo, en estudios posteriores<sup>2</sup> se demostró que, cuando la concentración del arsénico es menor a 0.150 mg/L, la filtración directa (oxidación- coagulación- filtración) es la opción más sencilla y económica. Debido a esto, se recomendó la implementación de tratamiento centralizado mediante filtración directa a pie de pozo en la Comarca Lagunera<sup>3</sup>. Una de las funciones del IMTA en este tema, fue la elaboración de proyectos funcionales para la construcción de las plantas potabilizadoras en algunos pozos con presencia de arsénico por arriba del límite máximo permisible que marca la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000.

El esquema de tratamiento de una planta potabilizadora de filtración directa para remoción de arsénico está constituido por los siguientes procesos: **oxidación** o pre-oxidación en línea con hipoclorito de sodio comercial (NaClO), a una concentración del 13%, con la finalidad de oxidar el arsénico del estado III al V y asegurar una mejor remoción del mismo en las etapas de tratamiento posterior. El cálculo inicial de la demanda de cloro se realiza de acuerdo a lo recomendado por la USEPA (United States Environmental Protection Agency)<sup>4</sup> que es de tres veces la dosis estequiométrica para oxidar el arsénico, más una concentración adicional con el propósito de cumplir con el valor mínimo requerido de cloro libre residual para asegurar la desinfección en el agua que se envía a la red de distribución. La oxidación también promueve la formación de los hidróxidos de hierro que adsorben y co-precipitan el arsénico.

Posterior a la oxidación se lleva a cabo una etapa de **coagulación** en línea, mediante la adición de cloruro férrico comercial ( $\text{FeCl}_3$ ) al 40%; los flóculos así formados adsorben el arsénico contenido en el agua. El cálculo inicial de la demanda de hierro se realiza de acuerdo a la relación de masas entre el hierro adicionado y el arsénico removido (mgFe/mgAs), recomendada por la USEPA<sup>4</sup>, que es de 25. En la etapa de puesta en marcha de las plantas se optimiza la dosificación de cloruro férrico e hipoclorito de sodio, hasta alcanzar concentraciones de arsénico en el agua filtrada por debajo de 0.010 mg/L, cumpliendo así con el valor de referencia de las Guías de Calidad de agua Potable de Organización Mundial de Salud, la cual está por debajo del límite máximo permisible de la norma oficial mexicana antes citada (0.025 mg/L).

La dosificación de hipoclorito de sodio y cloruro férrico se realiza con bombas dosificadoras ajustables en función del flujo de agua de entrada a la planta y de la demanda por contenido de arsénico, hierro, manganeso y otros compuestos, por lo que es indispensable tener un medidor

de flujo. Tanto la oxidación como la coagulación se llevan a cabo en una unidad de mezcla rápida (mezclador estático), diseñada para todo el caudal.

Los flocúlos con el arsénico adsorbido son retenidos en **filtros rápidos** de lecho dual de arena-antracita. Para que este sistema opere de forma eficiente, el IMTA recomienda tasas de filtración entre 5 y 7 m/h<sup>3,5</sup>, es decir, por debajo de las consideradas normales para este tipo de filtros. En todos los casos, para plantas centralizadas, al menos debe haber dos filtros operando en paralelo y pueden ser a presión o a gravedad, dependiendo del caudal que se necesite tratar. Los filtros deben retrolavarse con agua tratada, tomada del tanque de almacenamiento, con carreras de filtración de aproximadamente 48 horas y con una tasa de retrolavado recomendada de 60 m/h<sup>3,5</sup>.

Estas plantas potabilizadoras incluyen un sistema de **tratamiento de los lodos** producto del retrolavado de los filtros, que consta de un sedimentador que hace la función de espesar los lodos, opera por lotes con tiempo de retención de dos horas y capacidad para el volumen de vertido de un retrolavado de 10 minutos<sup>3,5</sup>, incluye inyección de polímero en la tubería de descarga al sedimentador-espesador y un filtro prensa de operación también por lotes. El agua clarificada se recircula por bombeo al inicio del sistema de tratamiento.

El agua tratada libre de arsénico se almacena en un tanque donde es bombeada a la red de distribución. La capacidad del tanque se diseña generalmente para 30 minutos de autonomía, además de un volumen extra para el retrolavado de un filtro, es decir, si el pozo detiene su operación por alguna razón, se podrá bombear a red el caudal de diseño durante 30 minutos y retrolavar un filtro<sup>3,5</sup>.

En diversos proyectos, personal del IMTA ha proporcionado asistencia técnica a la CONAGUA (Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte, OCCCN) durante el diseño, construcción y puesta en marcha de plantas de filtración directa a pie de pozo en la Región Lagunera de los estados de Durango y Coahuila<sup>6,7,8,9,10</sup>. Durante la puesta en marcha<sup>8</sup> las eficiencias de remoción de arsénico llegaron hasta el 95%, obteniendo concentraciones de arsénico en el agua filtrada por debajo de 0.010 mg/L.

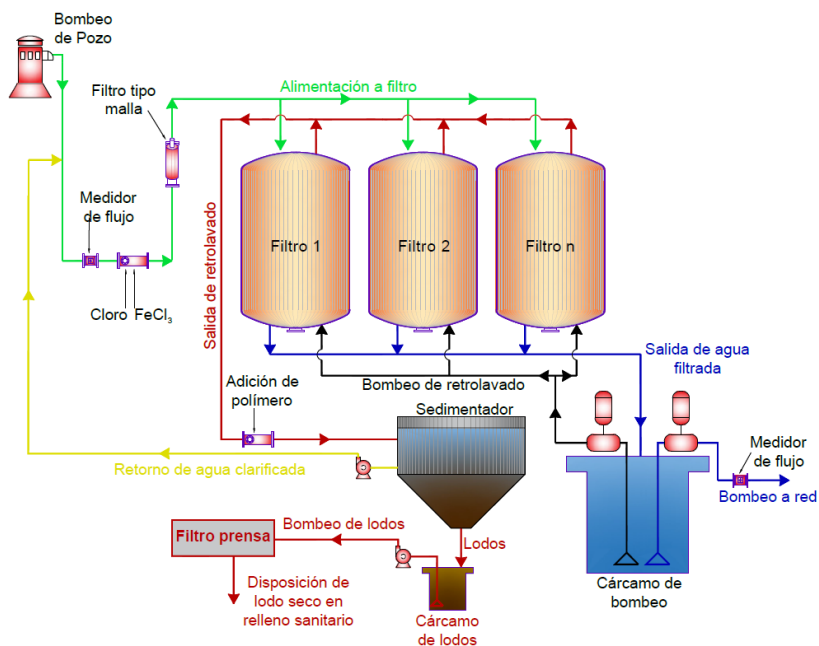


Figura 4.2. Diagrama típico de una planta para remoción de arsénico de filtración directa.

Cuando el problema del agua subterránea destinada al uso y consumo humano se atribuye únicamente al arsénico, el tratamiento es relativamente sencillo, puede ser hasta más económico que potabilizar agua superficial; sin embargo, cuando además del arsénico existen otros iones que rebasan la normatividad, el problema se complica y muchas veces la mejor opción son los procesos de membranas.

En este sentido, cabe resaltar que el IMTA seleccionó, mediante pruebas de tratabilidad a escala piloto, un sistema de tratamiento de filtración por membranas y participó en la elaboración del proyecto ejecutivo y posterior construcción, de una planta potabilizadora a pie del pozo para abastecer de agua potable a una comunidad de 7 mil personas<sup>11</sup>. La planta cuenta con dos módulos de nanofiltración de baja presión (70 psi) con capacidad para tratar 21.42 L/s y producir 15 L/s de agua potable cada uno, que corresponde a una recuperación de agua tratada del 70%. El agua de rechazo es enviada a lagunas de infiltración.

El tren de tratamiento es el siguiente: filtración en arena, adición de anti-incrustante, filtración en cartucho de polipropileno de 5 micras, filtración con membranas de nanofiltración y desinfección con hipoclorito de sodio. La planta utiliza la membrana más adecuada que se eligió a partir de los resultados en pruebas piloto con membranas de nanofiltración y ósmosis inversa, y permite reducir la concentración presente de arsénico en el agua cruda (0.082 mg/L) a menos de 0.010 mg/L, así mismo controla otros 5 parámetros (sulfatos, dureza total, sólidos disueltos totales, sodio y turbiedad) cuyas concentraciones exceden los límites máximos permisibles establecidos en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Este sistema permite producir agua con la concentración suficiente de sales minerales que permite evitar problemas de corrosión en el sistema de distribución o daños a la salud derivado de la ingestión de agua con baja concentración de sales minerales.



**Imagen 4.4.** Vista de ambos módulos de la planta de nanofiltración construida en San Pedro de las Colonias, Coahuila.

Estas tecnologías, cada una en su particular aplicación y para utilizarse como sistemas centralizados de potabilización, son las más económicas y eficientes para el tipo de agua que tratan, pero como cualquier sistema, requieren que se operen y se les dé mantenimiento adecuadamente, de lo contrario, el agua suministrada a la red no cumplirá con los niveles que se requieren para asegurar la salud de la población abastecida.

## Referencias

- <sup>1</sup> Calderón-Mólgora CG, Arroyo-Martínez P, Cruz-Gutiérrez FV, Garrido-Hoyos SE, Gelover-Santiago S, López-Corzo R, Martín-Domínguez A, Pérez-Castrejón S, Quezada-Jiménez ML, Rivera-Huerta ML, Segura-Beltrán N. Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de proyecto TC 0815.3. Financiado por Fondo Metropolitano de la Laguna.
- <sup>2</sup> Garrido-Hoyos SE, Piña-Soberanis M, Martín-Domínguez A. Remoción de arsénico mediante filtración directa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de proyecto TC 1011.3. Financiado por el Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón.
- <sup>3</sup> Piña-Soberanis M, Calderón-Mólgora CG, González-Herrera A, Martín-Domínguez A. Asistencia técnica para la licitación e instalación de plantas potabilizadoras para remoción de arsénico en Gómez Palacio, Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2011. Clave de proyecto TC 1124.3. Financiado por la Comisión de Agua del Estado de Durango.
- <sup>4</sup> United States Environmental Protection Agency (2003). Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems, EPA-816-R-03-014, July 2003.
- <sup>5</sup> Piña-Soberanis M, Calderón-Mólgora CG, Garrido-Hoyos SE, Rivera-Huerta ML, Montellano-Palacios L, González-Herrera A, Martín-Domínguez A. Estudio y asistencia técnica para la licitación e instalación de 7 plantas potabilizadoras para remoción de arsénico en Torreón, Coah. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2013. Clave de proyecto TC 1123.3. Financiado por el Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón.
- <sup>6</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Montellano-Palacios L, Pozo-Román F, Calderón-Mólgora CG, Piña-Soberanis M. Selección de trenes de tratamiento e ingeniería básica para potabilizar 26 fuentes de abastecimiento y elaboración de proyectos de seis plantas potabilizadoras en la región lagunera, estado de Coahuila de Zaragoza. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015. Clave de proyecto TC 1408.3. Financiado por CONAGUA.
- <sup>7</sup> Pozo-Román F, González-Herrera A, García-López AJ, Montellano-Palacios L, Piña-Soberanis M. Selección de trenes de tratamiento e ingeniería básica para potabilizar 21 fuentes de abastecimiento y elaboración de proyectos de seis plantas potabilizadoras en la región lagunera, estado de Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015. Clave de proyecto TC 1409.3. Financiado por CONAGUA.
- <sup>8</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Pozo-Román F, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2016. Clave de proyecto TC 1522.3. Financiado por CONAGUA.
- <sup>9</sup> García-López AJ, González-Herrera A, Pozo-Román F, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Coahuila de Zaragoza. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2017. Clave de proyecto TC 1521.3. Financiado por CONAGUA.
- <sup>10</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Villegas-Mendoza IE, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Coahuila. Etapa 2016. México.
- <sup>11</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2018. Clave de proyecto TC 1632.3. Financiado por CONAGUA.

## TECNOLOGÍAS A ESCALA DOMÉSTICA

Caminos de Agua, Grupo EoZ S.A. de C.V., Martín Piña Soberanis

En México, diferentes organizaciones sociales han tratado de abordar la problemática que representa el consumo de agua con arsénico y fluoruro en diferentes comunidades, principalmente rurales. En esta sección se presentan los esfuerzos y resultados del trabajo que han desarrollado dichas organizaciones; así como la evaluación que llevó a cabo el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para los sistemas de remoción a escala doméstica instalados en Gómez Palacio, Durango.

### Grupo EoZ S.A. de C.V.

El grupo EoZ S.A. de CV, del Instituto de Tecnologías Rurales ubicado en La Paz, Baja California Sur, promueve el desarrollo de filtros con diferentes medios adsorbentes comerciales para remoción de arsénico y fluoruro por separado. Los medios utilizados son a base de óxidos de hierro para la remoción de arsénico y a base de zeolitas modificadas con óxidos de aluminio para la remoción de fluoruro; también promueve resinas selectivas híbridas de intercambio aniónico<sup>1</sup>.

Los equipos, pueden ser instalados en el punto de entrada del agua a la casa (para tratar toda el agua) o solamente en el punto de uso, lo cual permite tratar solo el agua de bebida y para cocinar<sup>2</sup>. En el caso de ser necesario remover ambos contaminantes, arsénico y fluoruro, el fabricante sugiere instalarlos en serie.

El hidróxido de hierro utilizado para remover arsénico puede trabajar de forma eficiente en un amplio rango de pH y diferentes tipos de agua, logrando reducir hasta el 99% del total. La vida útil del medio adsorbente es de 4000 L aproximadamente, para concentraciones de arsénico de 0.040 a 0.100 mg/L<sup>1</sup>.

Por otro lado, el medio adsorbente para remover fluoruro contiene carbón activado de tipo animal (Bone Char) combinado con zeolita, que logra disminuir la concentración desde 4 mg/L a menos de 1 mg/L. Si la concentración inicial de fluoruro en el agua es mayor, se recomienda instalar filtros en serie, uno tras otro, para lograr concentraciones por debajo del valor indicado por la Modificación del año 2000 a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

### Caminos de Agua

La OSC Caminos de Agua, ha trabajado desde el 2014 en la región de la cuenca de la independencia, en la parte norte del estado de Guanajuato, en los municipios de San Miguel de Allende, Dolores Hidalgo, San José Iturbide, San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, Doctor Mora y San Felipe. A la fecha, dicha organización ha llevado a cabo el monitoreo de arsénico y fluoruro en pozos de agua de los municipios antes mencionados y ofrece a la población el servicio de cuantificación de los contenidos de arsénico y fluoruros en agua<sup>3</sup>. Particularmente, basados en la experimentación de dos tesis realizadas sobre la preparación y optimización del adsorbente<sup>4,5</sup>, están desarrollando la preparación del carbón de hueso, con la finalidad de bajar los costos de los sistemas a nivel rural y que sean accesibles para personas de bajos recursos. En esta situación, se tendrán que considerar las medidas para controlar la contaminación del aire en la zona donde se fabriquen dichos equipos.

Estos materiales adsorbentes han sido probados a nivel de columnas, en cartuchos de 700 ml rellenos del material seco y a flujos de 25 L/día (cantidad estimada para consumo de una familia de 5 integrantes). Los adsorbentes considerados en las pruebas han sido principalmente carbón de hueso de vaca obtenido de forma artesanal, con el cual han logrado una capacidad de adsorción de 1.2-1.3 mg de arsénico por gramo de material. Las limitantes del proceso artesanal son: la baja capacidad de adsorción comparado con el material obtenido en procesos bajo condiciones de temperaturas controladas de pirólisis, así como el alto impacto ambiental y posibles riesgos de salud pública por contaminación del aire. Se tienen varios proyectos en perspectiva, como la instalación de un sistema a escala piloto para la remoción de arsénico, con una producción de agua de 16 m<sup>3</sup>/ semana, utilizando el medio comercial Bayoxide® E 33, producido por la empresa Lanxess en Alemania; así como llevar a prueba varios equipos a escala de vivienda de 25 L/día en el presente año (2018)<sup>6</sup>.

### Evaluación de filtros domésticos

Personal del IMTA llevó a cabo la evaluación de un prototipo de los más de 62,000 filtros caseros marca TWI (The Water Initiative) que se instalaron para la remoción de arsénico en la zona de la Comarca Lagunera del Estado de Durango en año 2011<sup>78</sup>. El filtro de prueba consistió en un recipiente de PVC de 6" de diámetro, longitud total de 15" y tapas de PVC, empacado con 1,535 g de medio adsorbente a base de óxidos de hierro. El filtro se instaló en una derivación de un pozo, el cual tenía una concentración de arsénico entre 0.044 y 0.054 mg/L y se operó de forma continua durante 27 días. Personal del Sistema Descentralizado de Agua Potable y Alcantarillado de Gómez Palacio (SIDEAPA) y de la empresa TWI, estuvieron presentes durante las pruebas en campo para constatar la operación, la toma de muestras y el envío del agua para su análisis a un laboratorio acreditado.

El filtro se operó a un caudal promedio de 1,500 mL/min, con la finalidad de obtener una saturación acelerada del medio; para lograr esto se requirió aplicar una presión inicial de 0.9 kg/cm<sup>2</sup>. Conforme transcurrió el tiempo (Figura 4.3) se tuvo que aumentar la presión paulatinamente hasta 1.8 kg/cm<sup>2</sup> para mantener el caudal establecido; esto fue un indicativo del taponamiento gradual del filtro. A partir de los 30 m<sup>3</sup> tratados (333 h de operación), se llegó a la presión máxima del pozo y ya no fue posible contrarrestar la reducción del flujo, el cual disminuyó paulatinamente hasta los 500 mL/min.

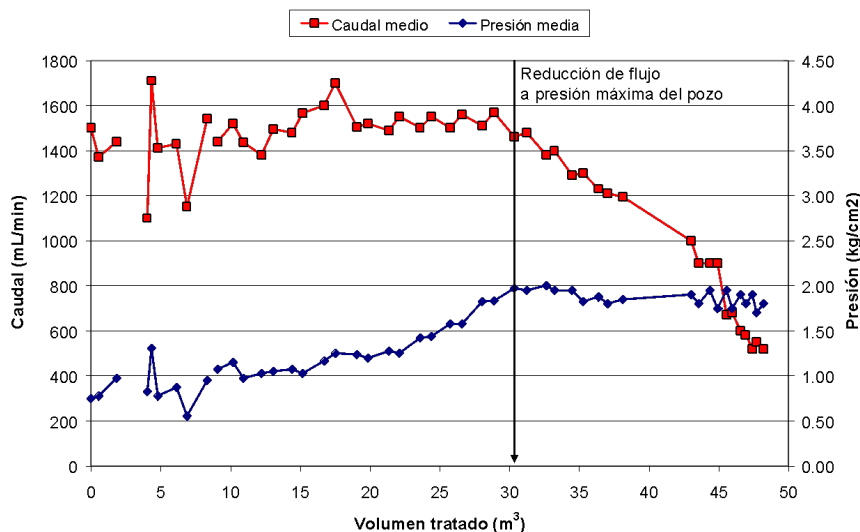


Figura 4.3. Comportamiento de la presión y caudal de filtro TWI respecto al volumen de agua tratada

La concentración de arsénico a la entrada y salida del filtro se midió mediante espectrofotometría de absorción atómica (AA) por generador de hidruros y con el método rápido denominado Arsenator; el efluente del filtro inició en 2.1 µg/L y llegó a 7.6 µg/L, con una eficiencia promedio de remoción del 88.7% hasta los 45.5 m<sup>3</sup> de agua tratada.

También se compararon los resultados obtenidos en el pozo con el filtro TWI, con las pruebas piloto de adsorción realizadas por personal del IMTA en el 2010<sup>8</sup>, en un pozo de la ciudad de Torreón, Coahuila, utilizando filtros empacados con un medio comercial de la empresa DOW. El filtro TWI demostró tener una capacidad de adsorción de 1.54 mg As/g de adsorbente, mientras que con el filtro empacado con el medio adsorbente DOW se obtuvo 1.42 mg As/g de adsorbente, valores que se consideran de magnitudes muy similares.

De estas pruebas se concluye que los filtros caseros instalados en La Comarca Lagunera tienen capacidades de adsorción muy semejantes a otros medios comerciales y que, al operar de forma continua sin posibilidad de limpieza del medio, se colmatan y disminuye con el tiempo su capacidad de producción de agua. De acuerdo con los resultados del análisis, el IMTA<sup>8</sup> considera que los riesgos por operación y control sanitario son más elevados en el caso de los filtros caseros, sugiriendo la implementación de tratamiento centralizado para poblaciones mayores de 500 habitantes.

Los filtros que se instalaron en Gómez Palacio, Durango, fueron distribuidos e instalados gratuitamente por un programa del Gobierno del Estado en diferentes colonias de la localidad; sin embargo, no hubo seguimiento de dicho programa y tampoco se tomaron en cuenta las condiciones hidráulicas de las viviendas. Los resultados a la fecha no se conocen, no obstante, se sabe por comunicación verbal con algunos usuarios, que “el agua no sale”, por lo que prácticamente no son usados y el fin que se perseguía no ha sido cubierto. La gran desventaja de estos sistemas sigue siendo el seguimiento en la operación y el monitoreo de los mismos, ya que tanto el fluoruro como el arsénico no proporcionan olor, color o sabor al agua, por lo que solo pueden ser analizados en laboratorio, responsabilidad que difícilmente puede ser delegada a los habitantes de la comunidad. Los equipos de monitoreo que existen en el mercado son a la fecha caros para los niveles socioeconómicos de México.

### Ventajas y desventajas de los sistemas domiciliarios

Los filtros domésticos tienen la ventaja de que se pueden adquirir directamente en el mercado, y por ser un producto comercial, deben someterse a las pruebas que establece la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) para dispositivos intra-domiciliarios. Sin embargo, estas pruebas sólo están enfocadas a la calidad bacteriológica, por lo que se requiere que este tipo de sistemas sean analizados en cuanto a su eficiencia, duración, comportamiento en el tiempo, facilidad de operación, entre otros. La mayoría de los sistemas intra-domiciliarios se instalan para tratar exclusivamente el agua que se utiliza para beber o para preparar alimentos. Por otro lado, estos dispositivos presentan algunas desventajas, tales como:

1. son susceptibles de sufrir colonización bacteriana por efecto de cisternas y tinacos que no reciben mantenimiento por parte de los usuarios;
2. si la tasa de consumo es mayor que la planeada, ya sea por contar con mayor número de habitantes en la casa o porque los patrones de consumo no sean los promedio, el medio adsorbente se saturará antes de lo esperado y esa familia estará en riesgo de ingerir agua contaminada creyendo que el filtro sigue tratando el agua que consumen;
3. el monitoreo se tiene que hacer en las casas de los usuarios y los equipos de medición son caros y de baja confiabilidad en los resultados, si no se manejan adecuadamente;

4. el costo de inversión y operación lo absorbe el usuario, a diferencia de los sistemas centralizados.

## Referencias

1. <https://www.aqualimpia.mx/collections/filtros-de-agua-para-arsenico-y-fluor-arsenic-and-fluoride-water-filters>
2. Sitio web de Grupo EOZ: <https://www.aqualimpia.mx/>
3. Sitio web de Caminos de Agua: <https://caminosdeagua.org/es/inicio>
4. Martijn E. Thesis Research Project, Developing a low-cost filter medium for remediation of arsenic in contaminated groundwater, Van Hall Larenstein, University of Applied Sciences (Leeuwarden, The Netherlands), Caminos de Agua, 7-7-2017.
5. Simona D. Developing Adsorption Filters for Fluoride and arsenic removal from water. Thesis of The University of Edinburgh, April 2018. Engineers without borders, Caminos de agua. 2018.
6. <http://bayferrox.com.br/es/products-applications-br/applications/drinking-water-treatment/>
7. Piña-Soberanis M, Calderón-Mólgora CG, González-Herrera A, Martín-Domínguez A. Asistencia técnica para la licitación e instalación de plantas potabilizadoras para remoción de arsénico en Gómez Palacio, Durango. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 2011. Clave de proyecto TC 1124.3. Financiado por la Comisión de Agua del Estado de Durango.
8. Calderón-Mólgora CG, Arroyo-Martínez P, Cruz-Gutiérrez FV, Garrido-Hoyos SE, Gelover-Santiago S, López-Corzo R, Martín-Domínguez A, Pérez-Castrejón S, Quezada-Jiménez ML, Rivera-Huerta ML, Segura-Beltrán N. Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2010. Clave de proyecto TC 0815.3. Financiado por Fondo Metropolitano de la Laguna.

# CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO Y EXPERIENCIAS EN CAMPO

## CASO LA LAGUNA

Irais Poblete-Naredo, José Javier García-Salcedo, Juan E. Salinas-Aguirre, Rogelio O. Corona-Núñez y Arnulfo Albores

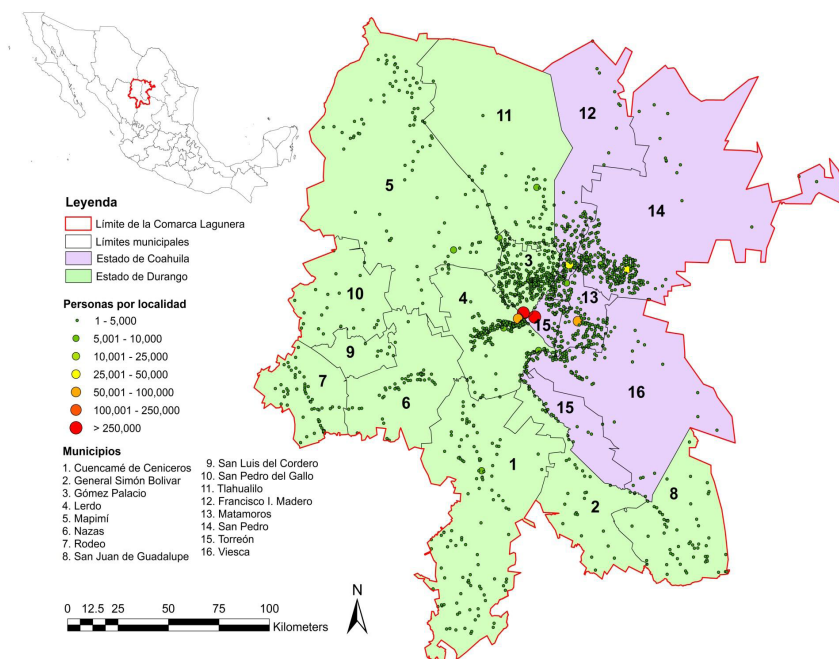
El origen de la Comarca Lagunera data de 1598. Cuando se fundó el Mineral de Mapimí era habitada por indígenas irritilas. La Comarca o Región es una área semidesértica ubicada en el centro-norte de la República Mexicana ( $103^{\circ} 45'$  y los  $102^{\circ}$  de longitud oeste y entre los  $25^{\circ} 15'$  y los  $26^{\circ} 15'$  de latitud norte), comprendida entre los estados de Durango y Coahuila<sup>1</sup>, con una superficie de 47,890 Km<sup>2</sup>, con clima desértico y templado, pocas lluvias y vegetación característica de estas áreas (Figura 5.1)<sup>2,3</sup>. Los ríos Nazas y Aguanaval y varios arroyos formados por los escurrimientos conforman una cuenca cerrada que llegaba hasta la parte baja de la región y daban origen a las lagunas de Mayrán, Viesca, Tlahualilo y Seca. La región cuenta con un acuífero formado por rellenos aluviales, que se recarga con las infiltraciones de ambos ríos<sup>4</sup>.

La Comarca Lagunera está constituida por 11 municipios de Durango y 5 de Coahuila en la que habitan 1,200,000 pobladores, distribuidos en un área metropolitana constituida por las ciudades de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo, otras más pequeñas como San Pedro de las Colonias y Francisco I. Madero y un número considerable de pequeños asentamientos dispersos en todo su territorio. Las principales actividades de la Región son industriales, agrícolas y ganaderas, en esta última se destaca por ser la cuenca lechera más productiva del país.

### Arsénico en suelos

El suelo y el subsuelo de la Comarca Lagunera se encuentran formados por rocas sedimentarias cuyos contenidos de arsénico varían de los 0.64 a 1.23 mg/kg (Figura 5.2)<sup>5</sup>. Debe tenerse en cuenta que en sitios en donde están presentes otros tipos de rocas, por ejemplo, ígneas cercanas a la Sierra Madre (en la provincia volcánica más grande del mundo), las concentraciones del metaloide pueden alcanzar los 10 a 600 ppm, e inclusive los 900 ppm. Por otra parte, las concentraciones en las capas de suelos superficiales son compatibles con su uso en agricultura, pues están en un intervalo de 0.64 a 1.12 mg/kg. Las condiciones del suelo, por ejemplo, la presencia de algunos iones como calcio, pH ácidos o la adición de fertilizantes con fosfatos, favorece su movilización, por lo que la disponibilidad del arsénico se eleva significativamente<sup>5,6</sup>.

También debe tenerse en cuenta la contribución antropogénica. Un ejemplo de ello es la industria metalúrgica pues al desarrollarse sin normas ambientales, con sus emisiones contribuyeron a incrementar los niveles de arsénico hasta 113 ppm en el área urbana<sup>7</sup>, y hasta 580 ppm en suelos de patios de casas-habitación de las áreas aledañas<sup>8</sup>. Cabe mencionar que las concentraciones de arsénico en agua correlacionan positivamente con aquellas de fluoruro<sup>9</sup>.



**Figura 5.1.** Mapa de la Comarca Lagunera. Se muestra la localización de la región Lagunera en la República Mexicana (extremo superior izquierdo), distribución de su población y municipios que la conforman.

## Arsénico en el agua

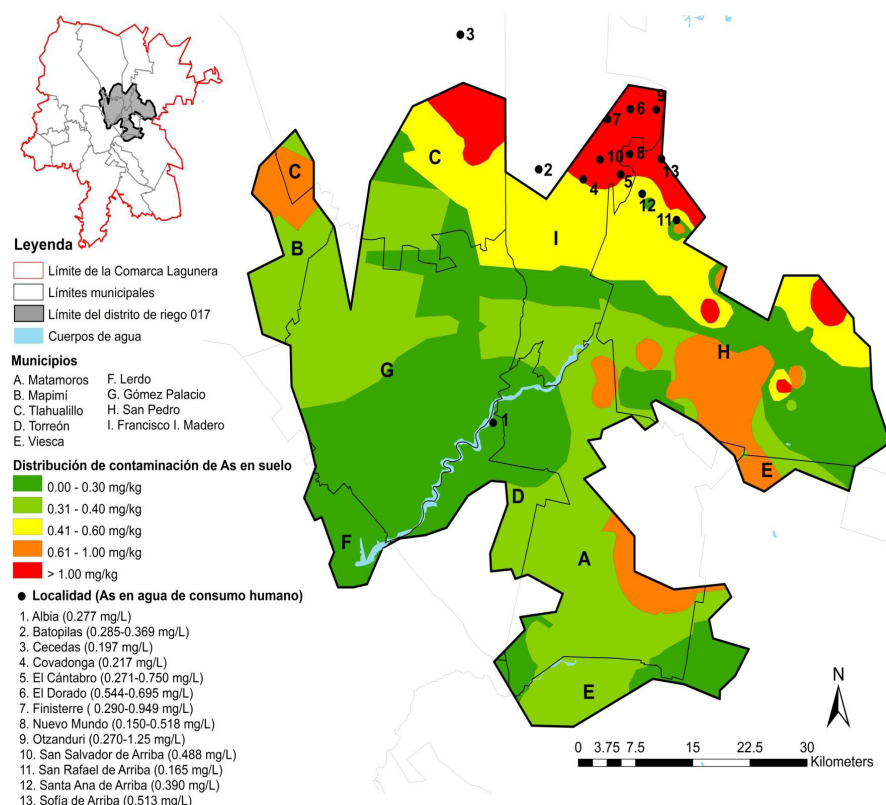
El agua es, probablemente, el factor limitante más importante en el desarrollo económico-industrial de la Comarca Lagunera, la cual es una cuenca endorreica formada por los ríos Nazas y Aguanaval, que captan 223 hm<sup>3</sup> anuales, aunque sus aportes son muy irregulares por las características geográficas y climatológicas que presenta<sup>10</sup>. Durante mucho tiempo el agua se distribuyó indiscriminadamente hasta 1891, año en que se creó la Comisión Inspector del Nazas reglamentando su empleo; el advenimiento del reparto agrario en 1936 terminó con esta práctica<sup>4</sup>. A partir de esa fecha se inicia la construcción de presas para mejorar el aprovechamiento de este recurso. Una de ellas, El Palmito, se terminó de construir en 1946, y sus aguas se distribuyeron a los ejidatarios (85%) y pequeños propietarios (15%), lo que dio lugar a la creación del “Distrito de Riego Número 17 de la Región Lagunera” que funciona hasta ahora y que agrupa a ocho acuíferos: Principal, Acatita, Las Delicias, Villa Juárez, Ceballos, Aguanaval Oriente, Nazas y Vicente Suárez. Por la magnitud de las reservas, el Principal es el acuífero más importante<sup>11</sup>, y del que depende la zona urbana de la región cuyo consumo supera los 70 millones m<sup>3</sup>, que se extraen de 98 pozos ubicados en el área metropolitana de la Laguna<sup>11</sup>.

Con el incremento de la demanda de agua y debido a la variabilidad estacional y anual en las avenidas de agua, se hace necesario extraerla de los acuíferos, aún más, es la única forma de obtenerla, pues no se cuenta con otra fuente permanente de este recurso. Situaciones similares suceden en otras regiones áridas del país. En particular, para la Región Lagunera el agua proveniente de los acuíferos significa un suministro de 28,000 hm<sup>3</sup>/año gran parte de este recurso se considera como no renovable<sup>12</sup>.

En la Región Lagunera, el balance entre la extracción y la recarga de los acuíferos no se encuentra en equilibrio; como resultado de ello los acuíferos Principal, Ceballos, Villa Juárez, Paila y Aguanaval

Oriente se encuentran sobreexplotados. Se estima que la recarga anual es de 1,291 millones de m<sup>3</sup> (67% del agua extraída), con un déficit de 636 millones de m<sup>3</sup>; su principal empleo es el agrícola (91%), ya que el restante 9% se utiliza en otras actividades, incluyendo el urbano e industrial<sup>10</sup>.

El empobrecimiento del acuífero se ha atribuido a la agroindustria, pues la Región Lagunera es la cuenca lechera más productiva del país, generando 2,433 millones de litros anuales, equivalente al 21% del total nacional<sup>13,14</sup>. Lamentablemente, este agotamiento de los mantos freáticos hará que el agua extraída para uso y consumo humano sea cada vez de peor calidad, pues al ser extraída a mayores profundidades, su contenido en iones disueltos como el arsénico, será más elevado<sup>12,15</sup>. Para ello, se han implementado diversas estrategias para distribuir agua de calidad compatible con la salud.



**Figura 5.2.** Distribución de arsénico en suelo en el Distrito de Riego 017 (DR017). Se muestra la localización del DR017 en la Comarca Lagunera (extremo superior izquierdo), la predicción de la distribución espacial de arsénico en suelo según Rodríguez-Garrido, 2017<sup>6</sup>; así como la ubicación de comunidades con alto contenido de arsénico en agua<sup>4,16-20</sup>.

## El arsénico en la Región Lagunera

La intoxicación con arsénico ha sido endémica en la Región Lagunera y despertó el interés de médicos de la localidad desde los años 50s. Los primeros casos de intoxicación con arsénico en el área urbana se registraron en las colonias Miguel Alemán y Eduardo Guerra en Torreón, Coahuila. Su seguimiento inició en 1959, con el primer caso reportado en la región. En 1962 se identificaron otros 175 casos, de los cuales 19 requirieron hospitalización. El 96.82% de los pacientes manifestaron haber consumido agua de pozo, la cual contenía 3.98 mgAs/L. Ambas colonias se

encuentran colindantes con la industria Met-Mex Peñoles, que para esa época ya contaba con 60 años de haberse establecido e iniciado operaciones en la producción y manejo de metales como el plomo, cadmio y arsénico. Los habitantes habían reportado molestias desde 1937 con respecto a los polvos y humos que emitía la industria, refiriendo irritación de las mucosas y sabor metálico en la boca. En consecuencia, se analizó el agua de descarga, pozos, suelos y emisiones atmosféricas en la cercanía a la Industria. Sus emisiones de agua daban lugar al canal abierto conocido como el “Tajo de la Perla” que registraron hasta 0.534 mgAs/L. Los suelos aledaños y pozos más cercanos presentaron, de igual forma, concentraciones elevadas del metaloide. En tanto, las emisiones atmosféricas indicaron que la industria arrojaba cerca de 400 Kg de arsénico al día. Después de un estudio médico en la población, el número de casos en ambas colonias ascendía a 297, de los cuales 8 de ellos tuvieron intoxicación grave y 2 defunciones<sup>3,21</sup>. El Dr. Edmundo Sánchez de la Fuente (epidemiólogo) reportó, además, intoxicaciones por contacto con insecticidas ricos en arsénico o por el consumo de alimentos contaminados por éstos. Identificó 1,129 casos entre los años 1974-1976. En los mismos años, poblaciones como Mapimí y Canatlán en Durango presentaron intoxicaciones colectivas por alimentos<sup>22</sup>. En 1976, se describió una epizootia vacuna ocurrida por el uso de complementos alimentarios con abundante arsénico. Se produjo una morbilidad de 6,014 cabezas de ganado, de las que murieron 1,500 y quedaron afectadas 1,396, perjudicando fuertemente la economía de la Región<sup>23</sup>.

No obstante, los casos de intoxicación por arsénico no se limitaron a fuentes antropogénicas de contaminación, ya que un análisis de 193 pozos representativos de toda la Comarca Lagunera arrojó que más del 62% de ellos superaban los niveles máximos permisibles de arsénico en agua de bebida (establecido en ese entonces en 0.05 mg/L) y que 46.75% superaban los 0.85 mgAs/L<sup>24</sup>. En 1963, el Dr. Adolfo Chávez y colaboradores del Instituto Nacional de Nutrición, publicaron una serie de tres artículos donde describen la situación de arsenicismo crónico en la comunidad de Finisterre (Francisco I. Madero), Coahuila<sup>219,25</sup>. En dicha comunidad, la concentración de arsénico en agua variaba entre 0.628 y 0.949 mg/L, donde se registraron 114 (38.8%) casos positivos de intoxicación en 294 pobladores de todas las edades. Para 1966, había en la zona rural cerca de 335 enfermos aparentes (5.3% de la población)<sup>24</sup>.

Posteriormente, Bracho-Flores (1971) describió la presencia de hidroarsenicismo en otras tres poblaciones rurales: Otzanduri, Nuevo Mundo y El Cántabro (Francisco I. Madero), que presentaban concentraciones máximas de arsénico en agua de 1.25 mg/L, 0.15 mg/L y 0.75 mg/L, respectivamente<sup>18</sup>. En los años 70s, Bulmaro Valdéz Anaya profesor de Universidad Autónoma de Coahuila (UAC), Unidad Torreón determinó un alto contenido de arsénico en el agua de bebida del ejido Batopilas (Francisco I. Madero). Conjuntamente, en el Hospital Universitario (1970-1973) el Dr. Arnulfo Corona (dermatólogo) y el Dr. Arnulfo Portales Portales (patólogo) identificaron a residentes con lesiones que correspondían a arsenicismo. Con esta retroalimentación, maestros y estudiantes de la Facultad de Medicina de la UAC evaluaron las concentraciones de arsénico en el agua de bebida de la región. Los poblados identificados con arsénico en agua por encima de 0.05 mg/L, además de los ya descritos, fueron San Salvador de Arriba y El Venado (Francisco I. Madero) y Sofía de Arriba (San Pedro). A partir de 1978 se realizaron estudios de seguimiento epidemiológico sistemáticos. Se evaluaron tanto problemas de parasitosis<sup>26</sup> como de contaminación ambiental, incluyendo la contaminación con plomo en Torreón derivado de los desechos de la Planta Peñoles<sup>27</sup>,

Con la incorporación del Dr. José Javier García Salcedo (1980) a la UAC, se determinaron concentraciones de arsénico en el agua en los municipios de San Pedro y Francisco I. Madero, en el 90% de los ejidos y cabeceras municipales de toda la Comarca. Así, se sumaron a la lista de los ejidos con altas concentraciones de arsénico en el agua: San Rafael de Arriba (San Pedro), Albia (Torreón), San Salvador, Covadonga, 18 de Marzo, Charcos de Risa y El Dorado (Francisco I. Madero), y Ceceda, La Campana, Balcones y Jauja (Tlahualilo). En la Figura 5.2 se muestran algunas localidades

y sus respectivas concentraciones de arsénico en el agua de bebida. Las concentraciones altas de arsénico en agua corresponden, en su mayoría, a niveles altos en suelo.

El nivel de exposición a arsénico en la Región Lagunera, a partir del agua de bebida, se ha estimado entre 0.6 y 43  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  al día. La ingesta diaria recomendada por la OMS (1989) no debería sobrepasar los 2.14  $\mu\text{g}$  de arsénico/ $\text{Kg}$  de peso/ por día, por lo que la ingesta diaria en la región llega a ser hasta 20 veces superior. El arsénico además puede ingerirse en alimentos preparados con agua contaminada, en frutas y hortalizas regadas con agua rica en arsénico o en productos de animales que consumen agua y/o vegetación igualmente contaminados. Los alimentos cocinados con un mayor volumen de agua y con mayor tiempo de cocción por ebullición resultan los de mayor contenido del metaloide<sup>28</sup>. En la alfalfa, el cultivo más importante de la región, el arsénico se localiza principalmente en las raíces más que en las partes aéreas, con un máximo de 3.16  $\mu\text{g}/\text{g}$ <sup>29</sup>. Sin embargo, el lavado de la planta reduce cerca del 50% de su contenido y no contribuye significativamente a su ingesta diaria. En la leche de vaca, se han registrado hasta 27.4  $\text{ng}/\text{g}$  de arsénico en granjas de Francisco I. Madero y 14.8  $\text{ng}/\text{g}$  en la localidad de Matamoros<sup>29</sup>. A partir del consumo en agua de bebida, se estima que la población de Francisco I. Madero Coahuila, es una de las más expuestas en la región y presenta un riesgo casi 15 veces más elevado a padecer cáncer de piel con respecto al riesgo en función de la normatividad NOM 127 SSA-2000 a una concentración de 0.050  $\text{mg}/\text{L}$  de arsénico en agua<sup>30</sup>. Este riesgo es evidentemente mayor al considerar la posterior modificación a la mencionada norma que contempla la concentración de arsénico de 0.025  $\text{mg}/\text{L}$ . Para 1979 la Comarca Lagunera poseía la frecuencia más alta de tumores malignos respecto al resto de la República Mexicana<sup>31</sup>.

Los estudios realizados a los habitantes de las localidades más afectadas indicaron signos y síntomas claros de intoxicación por arsénico. Entre las manifestaciones clínicas típicas se encuentran dolor de estómago y de cabeza, somnolencia, entumecimiento, hormigueo, sensación de ardor en pies y manos, y pérdida de la sensibilidad al tacto. Estas poblaciones tuvieron una alta incidencia de alteraciones en la coloración de la piel o discromías, así como hiperqueratosis palmoplantar o engrosamiento de la piel en las palmas de manos y pies<sup>32-35</sup>. En los casos más graves se observaron lesiones ulcerativas, cáncer de piel y vasculopatías periféricas graves (gangrena seca), predominantemente en los miembros inferiores (síndrome de pie negro). Aun cuando estos síntomas se atribuyen exclusivamente a la intoxicación con arsénico, se desconoce si son el resultado de la co-exposición de los individuos con otros metales que se encuentren enriquecidos en el agua de bebida. Las concentraciones de fluoruro, por ejemplo, en aguas subterráneas y suelos superficiales en la Comarca Lagunera, también rebasan los límites máximos propuestos por la OMS, y en el caso del agua de pozo, las concentraciones altas de fluoruro están directamente relacionados con las del arsénico<sup>9,36</sup>. Por lo que, existe la posibilidad de que estos y otros elementos interactúen, originando un cuadro toxicológico complejo en los individuos expuestos.

En la comunidad de Santa Ana de Arriba (San Pedro, Coahuila), donde la concentración promedio de arsénico en agua era de 0.4  $\text{mg}/\text{L}$ , se determinó que el hidroarsenicismo puede conducir a una respuesta inmunológica deficiente y daño genético<sup>20,37,38</sup>. En niños de primaria de Torreón y Gómez Palacio, la exposición a arsénico produjo daño severo al DNA y una menor capacidad de reparación de daño genotóxico<sup>39</sup>. De igual manera, en niños de 6-8 años residentes de la Ciudad de Torreón, disminuyó su desempeño en tareas cognitivas relacionadas con memoria y resolución de problemas<sup>40</sup>. Adicionalmente, en varias localidades de la Comarca, varones en edad reproductiva presentaron una reducción en la calidad espermática y alteración de la función endócrina<sup>41</sup>.

Con conocimiento del problema del arsénico en la Comarca Lagunera, aunado al incremento en el número de habitantes intoxicados, el descontento en la población se hizo presente. Es por esto que en 1986, se generó un movimiento popular conformado por líderes campesinos como Andrés

Araujo de la Torre y Salvador Hernández Vélez, por estudiantes y sacerdotes. Todos ellos apoyados por la Asociación para Defensa del Ambiente. Se convocó a una reunión en el ejido Batopilas, con cita a las autoridades Municipales de Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias, a representantes del Gobierno del Estado de Coahuila y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para exponer y exigir solución a la problemática de la contaminación del agua. Los puntos de acuerdo fueron: 1). Llevar agua sin contaminantes a los habitantes mayormente expuestos, 2). Instalación de plantas de remoción de arsénico (ósmosis inversa) en los ejidos Batopilas, 18 de marzo, Finisterre y el Cántabro, y 3). Elaboración de un estudio epidemiológico conjunto (Facultad de Medicina de la UAC, Hospital Universitario, IMSS y SSA) para la detección y atención de personas expuestas. Se decidió, entonces, construir pozos para la extracción de agua libre de arsénico y se colocó un tanque de almacenamiento y cloración en el ejido 20 de noviembre en el municipio de Matamoros para alimentar a dos unidades de re-bombear en Lucero, Durango y Caballo Blanco en la Cabecera Municipal de Francisco I. Madero, para distribución de agua a las zonas más afectadas. Pese a los esfuerzos por abastecer a las comunidades de agua libre de arsénico, la sobreexplotación del acuífero generó que estas fuentes de agua también se contaminaran. Hoy en día el descontento continúa. La recarga de los mantos freáticos y la disponibilidad del agua ha disminuido considerablemente, dada la mayor demanda del líquido vital por la población, así como por la industria agropecuaria, agroindustrial y textil. Todo esto aunado a que, al parecer por intereses económicos, se construyó la presa el Paso del Tigre y se planeó la construcción de la presa del Cañón de la Cabeza. Proyectos que, en conjunto con las presas ya existentes en la región, disminuirán aún más la recarga de los mantos acuíferos, así como el problema de desabasto de agua<sup>42</sup>. Asociaciones como Encuentro Ciudadano Lagunero y Para la Defensa del Ambiente, actualmente tienen como objetivo crear una conciencia social sobre el cuidado al medio ambiente, planteando proyectos específicos para su mantenimiento. Otras, como Consejo ciudadano por el Agua de la Comarca Lagunera pretenden propiciar una cultura del agua para optimizar su uso.

### Aprovisionamiento de agua con concentraciones aceptables de arsénico.

Cubrir las necesidades de agua con concentraciones aceptables para consumo humano ha sido un reto que han contemplado las autoridades. Para ello han diseñado diversas estrategias, entre ellas: 1) Distribución de agua proveniente de áreas no contaminadas, 2) floculación del metaloide con sulfato férrico, 3) empleo de destiladores solares y 4) floculación de arsénico intra-domiciliaria.

- 1) Para surtir agua con niveles de arsénico aceptables, fue necesario construir un sistema de distribución que la condujera a los poblados que la necesitaban, cubriendo tanto los municipios de Francisco I. Madero como de San Pedro de las Colonias (Imagen 5.1).
- 2) Actualmente, en las cercanías de Francisco I. Madero, se cuenta con cuatro plantas de tratamiento del agua para eliminar arsénico y su distribución y bombeo a las poblaciones afectadas. La distribución a los poblados es cada cuatro días. El manejo de dichas plantas está a cargo de la CONAGUA y localmente por los sistemas municipales.
- 3) Teniendo en cuenta la insuficiencia para llevar agua de calidad a los poblados más alejados en la Región (20% de los habitantes) se propuso la construcción de destiladores solares para remover al arsénico, procedimiento que aprovecha las horas de sol y las altas temperaturas características de la Región. Los modelos preliminares de los equipos desarrollados mostraron que aguas conteniendo de 0.5 a 0.3 mg/L contenían de 0.001 a 0.004 mg/L luego de procesarla, con un rendimiento de 2.47 a 3.85 L/día. Sin embargo, solo se utilizaron los prototipos en algunos poblados<sup>43</sup>. 4) La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), inició un programa de abastecimiento de agua tratada para eliminar arsénico utilizando el método de osmosis inversa instalados en vehículos. Por otra parte se han propuesto equipos caseros

de floculación del arsénico con sulfato férrico. Con estos equipos caseros se ha logrado remover más del 93% de la concentración inicial del contaminante, aunque en algunas otras se mantenía el arsénico, pero a concentraciones muy pequeñas, las características químicas del agua generada son aceptables, como la cantidad de elementos como calcio, magnesio y fierro, en cuanto a los aniones, solo el sulfato se incrementa. Los autores demuestran que el metaloide puede disolverse nuevamente cuando el pH se hace muy ácido<sup>44</sup>.



Imagen 5.1. Plantas de remoción de arsénico en San Pedro y Francisco I. Madero, Coahuila.

Sin embargo, aunque estos esfuerzos son importantes no son suficientes. Aún se siguen registrando casos graves de intoxicación, pobreza y desabasto de agua en las regiones rurales de Nuevo Mundo, Covadonga, Finisterre, el Cantabro y San Salvador<sup>45</sup>. En Torreón y Gómez Palacio, ya existe una Unidad Médica para la detección y atención de casos de cáncer, ello por el incremento de este padecimiento en la región, y el aumento de vasculopatías, diabetes mellitus e hipertensión arterial derivadas de la contaminación. Por lo tanto, es urgente garantizar el abasto de agua de calidad a los locatarios, logrando un equilibrio entre los intereses económicos, de salud y ambientales involucrados. Para ello, resulta imperativo revisar, analizar y entender la problemática a diferentes escalas (local, regional y nacional), pues el caso de contaminación y desabasto del agua, desgraciadamente, es ya un problema en todo el país con serias implicaciones en la salud y calidad de vida de la población.

## Referencias

1. CETENAL, Cartas Geográficas: GISB85, GISB86, G13B87, G13D15, G13D16, G13D17, GISD25, G13D26, G13D27. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F. (1976).
2. Chávez A, Bogrand R, Ramírez J, Pérez C, Hernández M, Rojas A. Estudios en una comunidad con arsenicismo crónico endémico. I. Datos generales de la comunidad. Salud Pública Mex. 6: 421-433 (1964).
3. Viniestra G, Escobar R, Borja M, Caballero PJ. La polución atmosférica e hídrica de Torreón, Coah. Salud Pública Mex. 6: 405-414 (1964).
4. SEDUE. Presencia del arsénico en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. [México DF]: SEDUE (1986). Archivo electrónico. [http://repositorio.inecc.gob.mx/ae3/AE\\_005004/ae\\_005004.pdf](http://repositorio.inecc.gob.mx/ae3/AE_005004/ae_005004.pdf). [Consultado en Agosto, 2018].
5. Hernández-Ordáz G, Segura-Castruita MA, Álvarez-González Pico LE, Aldaco-Nuncio RA, Fortis-Hernández M, González-Cervantes G. Comportamiento del arsénico en suelos de la Región Lagunera de Coahuila, México. Terra Latinoamericana. 31: 295-303 (2013).
6. Rodríguez-Garrido NE, Segura-Castruita MA, Orozco-Vidal JA, Fortis-Hernández M, Preciado-Rangel P, Olague-Ramírez J, Yescas-Coronado P. Arsénico edáfico y su distribución en el distrito de riego 017: uso de métodos de interpolación. Terra Latinoamericana. 35: 19-28 (2017).
7. Benin AL, Sargent JD, Dalton M, Roda S. High concentrations of heavy metals in neighborhoods near ore smelters in northern Mexico. Environ Health Perspect. 107: 279-84 (1999).
8. García-Vargas GG, Rubio-Andrade M, Rosales-González MG, Goytia-Acevedo R, García-Arenas G, Candelas-Rangel JL, Meza-Velázquez R, Caravanos. J. Contaminación por metales en suelos de la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. 6: 165-168 (2007).
9. Del Razo LM, Corona JC, García-Vargas G, Albores A, Cebrian ME. Fluoride levels in well-water from a chronic arsenicism area of Northern Mexico. Environ Pollut. 80: 91-4 (1993).

10. Cervantes MC, Franco-González AM. Diagnóstico ambiental de la Región Lagunera. (2006). Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Disponible en: <http://observatorioriegeograficoamericalatina.org.mx/egal11/Procesosambientales/Impactoambiental/22.pdf>. [Consultado en Agosto, 2018].
11. García-Salazar JA, Mora-Flores JS. Tarifas y consumo de agua en el sector residencial de la Comarca Lagunera. *Región y Sociedad*. 20: 119-132 (2008).
12. Arreguín-Cortés FI, Chávez-Guillén R, Soto-Navarro PR, Smedley PL. Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México. *Rev Tlaloc AMH*. 45: 15-35 (2009).
13. Cobian-Lafont A. La Laguna produce 2,433 millones de litros de leche al año, en Noticias del Sol de la Laguna (2017). Disponible en: <https://www.noticiasdelsoldelalaguna.com.mx/local/la-laguna-produce-2433-millones-de-litros-de-leche-al-ano>. [Consultado en Agosto, 2018].
14. Caldera-Orozco A, Muñoz-Herrera J. La producción de leche en la Comarca Lagunera (I), en *El Economista* (2017). Disponible en: <https://www.economista.com.mx/opinion/La-produccion-de-leche-en-la-Comarca-Lagunera-I-20171011-0106.html>. [Consultado en Agosto, 2018].
15. Ramírez-Cuevas J. La ley Lala en La Laguna. La industria lechera acaba con el agua, en *Masiosare*, publicación semanal de la Jornada, México, D.F. (2002). Disponible en: <http://www.jornada.com.mx/2002/07/07/mas-leche.html>. [Consultado en Septiembre, 2018].
16. Cinvestav. cómo se cita en Gutiérrez-Ojeda, 1995, p. 68. Department of Hydrology and Water Resources. The University of Arizona. (1986).
17. Gomez-Arroyo S, Hernandez-Garcia A, Villalobos-Pietrini R. Induction of sister-chromatid exchanges in Vicia faba by arsenic-contaminated drinking water. *Mutat Res*. 208: 219-24 (1988).
18. Bracho-Flores AR. Intoxicación arsenical crónica o arsenicismo crónico en la Comarca Lagunera de Coahuila. Escuela de Medicina. Universidad de Coahuila. Torreón, Coah. (1971).
19. Tovar E, Chávez A, Pérez C, Garmilla M. Estudios en una comunidad con arsenicismo crónico endémico. III. Ingestión y excreción de arsénico. *Salud Pública Mex*. 6: 443-449 (1964).
20. Gonsebatt ME, Vega L, Montero R, Garcia-Vargas G, Del Razo LM, Albores A, Cebrian ME, Ostrosky-Wegman P. Lymphocyte replicating ability in individuals exposed to arsenic via drinking water. *Mutat Res*. 313: 293-9 (1994).
21. Cantellano L, Viniestra G, Eslava R, Alvarez J. El arsenicismo en la Comarca Lagunera. Estudio Epidemiológico de arsenicismo en las colonias Miguel Alemán y Eduardo Guerra, de Torreón, Coah. *Salud Pública Mex*. 6: 375-385 (1964).
22. Rivera MÁ. Finisterre en el arsénico, en *Proceso* (1976). Disponible en: <https://www.proceso.com.mx/2613/finisterre-en-el-arsenico>. [Consultado en Agosto, 2018].
23. Excelsior. Año LIX, Tomo III, No. 21: 603, p. 1-A; 604, p. 23-A, 5 de junio, y 605, p. 4-A, 6 de junio. (1976).
24. Viniestra G. La contaminación atmosférica. *Salud Pública Mex*. 8: 601-607 (1966).
25. Chávez A, Pérez C, Tovar E, Garmilla M. Estudios en una comunidad con arsenicismo crónico endémico. II. Manifestaciones clínicas. *Salud Pública Mex*. 6: 435-442 (1964).
26. Valdez B, Albores A, Cebrián M, Téllez I. Prevalencia de parasitosis intestinal en una población rural de la Region Lagunera. *Salud Pública Mex*. 24: 55-60 (1982).
27. Calderon-Salinas JV, Valdez-Anaya B, Mazuniga C, Albores-Medina A. Lead exposure in a population of Mexican children. *Hum Exp Toxicol*. 15: 305-11 (1996).
28. Del Razo LM, Garcia-Vargas GG, Garcia-Salcedo J, Sanmiguel MF, Rivera M, Hernandez MC, Cebrian ME. Arsenic levels in cooked food and assessment of adult dietary intake of arsenic in the Region Lagunera, Mexico. *Food Chem Toxicol*. 40: 1423-31 (2002).
29. Rosas I, Belmont R, Armienta A, Baez A. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico. *Water Air and Soil Pollution*. 112: 133-149 (1999).
30. Vega-Gleason S. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; AIDIS. Memorias. FEMISCA (2002). <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/104.pdf>. [Consultado en Agosto, 2018].
31. Quinones Valenzuela A, Gosset Osuna IG, Carboney Castellanos A, Cortinas de Nava C, Ito F. Arsénico y Salud. *Salud Pública Mex*. 21: 187-97 (1979).
32. Albores A, Cebrian ME, Tellez I, Valdez B. [Comparative study of chronic hydroarsenicalism in 2 rural communities of the Laguna region of Mexico]. *Bol Oficina Sanit Panam*. 86: 196-205 (1979).
33. Cebrian ME, Albores A, Aguilar M, Blakely E. Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico. *Hum Toxicol*. 2: 121-33 (1983).
34. García-Salcedo J, Portales A, Blakely-Landecho E, Díaz R. Estudio transversal de una cohorte de pacientes con vasculopatía por intoxicación crónica arsenical en poblados de los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro, Coahuila, México. *Medicina de Torreón, Órgano de la Facultad de Medicina y de los Hospitales Universitarios de Torreón de la U.A.C*. 1: 12-16 (1984).
35. Ortiz-Mariotte C, Olivera-Toro R, Verdusco-Guerrero E. Intoxicación colectiva por arsénico en Torreón, Coah., México. II. Valoración final. *Boletín Epidemiológico*. 27: 221-252 (1963).
36. Sarinana-Ruiz YA, Vázquez-Arenas J, Sosa-Rodríguez FS, Labastida I, Armienta MA, Aragón-Pina A, Escobedo-Bretado MA, Gonzalez-Valdez LS, Ponce-Pena P, Ramirez-Aldaba H, Lara RH. Assessment of arsenic and fluorine in surface soil to determine environmental and health risk factors in the Comarca Lagunera, Mexico. *Chemosphere*. 178: 391-401 (2017).
37. Gonsebatt ME, Vega L, Salazar AM, Montero R, Guzman P, Blas J, Del Razo LM, Garcia-Vargas G, Albores A, Cebrian ME, Kelsh M, Ostrosky-Wegman P. Cytogenetic effects in human exposure to arsenic. *Mutat Res*. 386: 219-28 (1997).
38. Ostrosky-Wegman P, Gonsebatt ME, Montero R, Vega L, Barba H, Espinosa J, Palao A, Cortinas C, Garcia-Vargas G, del Razo LM, et al. Lymphocyte proliferation kinetics and genotoxic findings in a pilot study on individuals chronically exposed to arsenic in Mexico. *Mutat Res*. 250: 477-82 (1991).

39. Mendez-Gomez J, Garcia-Vargas GG, Lopez-Carrillo L, Calderon-Aranda ES, Gomez A, Vera E, Valverde M, Cebrian ME, Rojas E. Genotoxic effects of environmental exposure to arsenic and lead on children in region Lagunera, Mexico. *Ann N Y Acad Sci*. 1140: 358-67 (2008).
40. Rosado JL, Ronquillo D, Kordas K, Rojas O, Alatorre J, Lopez P, Garcia-Vargas G, Del Carmen Caamano M, Cebrian ME, Stoltzfus RJ. Arsenic exposure and cognitive performance in Mexican schoolchildren. *Environ Health Perspect*. 115: 1371-5 (2007).
41. Morán-Martínez J, Soto-Domínguez A. Efecto del arsénico sobre la calidad espermática y función endócrina en sujetos endémicamente expuestos. *Enlace Químico*. 1: 312-321 (2007).
42. Hernández-Navarro L. La Laguna: nueva guerra del agua/I, en *La Jornada*, México, D.F. (2004). Disponible en: <http://www.jornada.com.mx/2004/11/10/052n1con.php?printver=1&fly=>. [Consultado en Agosto, 2018].
43. García-Salcedo JJ, Salas-Peña E, Blakely-Landecho LE, Valdés-Anaya B, García-Vargas GG, Hernández-Serrano MC, Sanmiguel-Salazar MF. Destiladores de agua como método de remoción de sales de arsénico contenidas en el agua de bebida. *Bioquímica*. 41-44 (1992).
44. Gutierrez-Avila H, Becerra-Winkler S, Brust-Carmona H, Juarez-Mendoza J, Juarez Patino J. [Removal of arsenic from water for human consumption in homes in rural communities in the Comarca Lagunera, Mexico]. *Salud Pública Mex*. 31: 305-13 (1989).
45. Peña J. La Laguna: Los sobrevivientes del arsénico, en *Vanguardia*. Semanario, p. 2-13 (2011). Disponible en: <https://agua.org.mx/la-laguna-los-sobrevivientes-del-arsenico/>. [Consultado en Agosto, 2018].

## CASO DE ESTUDIO EN LA LAGUNA: PLANTAS POTABILIZADORAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Arturo González Herrera y Antonio Javier García López

En 2010 se observó que, en 88 de los 146 aprovechamientos destinados para uso público en La Región Lagunera, el contenido de arsénico rebasaba el valor de 0.010 mg/L establecido por la Organización Mundial de Salud (OMS).

De las tecnologías para remoción de arsénico evaluadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)<sup>1</sup>, considerando eficiencia, complejidad, costos de inversión y operación, la más favorable resultó la coagulación convencional (constituida por procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración), sin embargo, en estudios posteriores<sup>2</sup> se demostró que, cuando la concentración del arsénico es menor a 0.150 mg/L, la filtración directa (constituida por procesos de oxidación, coagulación y filtración) es la opción más sencilla en operación y mantenimiento, así como la más económica.

En 2011, el Sistema Municipal de Agua y Saneamiento (SIMAS) de Torreón, Coahuila, instaló las primeras siete plantas de filtración directa a pie de pozo. El caudal total de diseño fue de 195 L/s, para beneficiar a una población potencial de 67,390 habitantes<sup>3</sup>.

En el marco del Compromiso de Gobierno CG-114 (Impulsar obras de infraestructura que permitan mejorar el abasto y calidad del agua en la Región Lagunera), en 2013 la CONAGUA planteó acciones para el diseño y construcción de plantas potabilizadoras para remoción de arsénico y otros contaminantes en 50 fuentes de abastecimiento, 29 en la Región Lagunera de Coahuila y 21 en la de Durango, cuyo contenido de arsénico estaba entre 0.027 mg/L y 0.320 mg/L.

El IMTA proporcionó asistencia técnica a la CONAGUA en temas de: estudios preliminares (caracterización de calidad de agua de pozos, topografía de predios, eficiencias energéticas de equipos de bombeo, mecánica de suelos), elaboración de ingeniería básica, proyectos ejecutivos para plantas potabilizadoras, términos de referencia para licitar proyectos ejecutivos, construcción y puesta en marcha, verificación de obra y evaluación de funcionamiento integral de las plantas<sup>4,5,6,7</sup>.

Como resultado de los estudios preliminares e ingeniería básica<sup>4,5</sup>, la CONAGUA tomó la decisión, en conjunto con las Comisiones Estatales de Agua y los Organismos Operadores de Agua involucrados, de implementar plantas de filtración directa a pie de pozo, 29 en el estado de Coahuila y 16 en Durango. Mientras que en Coahuila se instalaría una planta por pozo, en Durango habría cuatro plantas que tratarían en conjunto los caudales de nueve pozos: el total de plantas será de 16 y 21 los pozos atendidos.

A la fecha (julio de 2018), se han construido 18 potabilizadoras en Coahuila y tres en Durango; el resto (11 en Coahuila y 13 en Durango), están en proceso de construcción y puesta en marcha. Una vez concluidas y puestas en operación todas las plantas, la población potencialmente beneficiada será de 312,000 habitantes en Coahuila y 325,000 en Durango, con caudales potabilizados de 1,080 L/s y 1,130 L/s respectivamente.

El costo estimado de operación y mantenimiento de las plantas de filtración directa, está entre \$0.60 y \$0.80 por metro cúbico tratado. Este costo incluye: reactivos químicos, energía eléctrica para equipos de bombeo y proceso (excluido la extracción por bombeo del pozo), mano de obra y

mantenimiento preventivo. Los Organismos Operadores de Agua municipales son los responsables de la operación y mantenimiento de las plantas potabilizadoras.

En las plantas de filtración directa evaluadas por el IMTA (Imágenes 5.2) durante la puesta en marcha<sup>6,7,8</sup>, las eficiencias en remoción de arsénico llegaron hasta el 95%, obteniendo concentraciones de arsénico en el agua filtrada por debajo de 0.010 mg/L, cumpliendo con el valor guía de la OMS (0.010 mg/L) y límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el año 2000 (0.025 mg/L). Estos valores se obtuvieron optimizando la dosificación de hipoclorito de sodio y cloruro férrico en función del caudal y de la concentración de arsénico en el agua sin tratamiento. Las relaciones de masas entre el hierro adicionado y el arsénico removido (mgFe/mgAs), determinadas por el IMTA en las plantas evaluadas, estuvieron entre 30 y 48, en comparación con el valor de 25 que es el recomendado por la United States Environmental Protection Agency (USEPA)<sup>9</sup>.



**Imagen 5.2-A.** Planta potabilizadora de filtración directa a presión del pozo Alamito en Francisco. I. Madero, Coahuila.



**Imagen 5.2-B.** Planta potabilizadora de filtración directa a presión del pozo 7 en Matamoros, Coahuila.



**Imagen 5.2-C.** Planta potabilizadora de filtración directa a gravedad de los pozos Transportes en Gómez Palacio, Durango.



**Imagen 5.2-D.** Planta potabilizadora de filtración directa a presión del pozo 15 Pueblo Nuevo, Gómez Palacio, Durango.

## Referencias

- Calderón-Mólgora CG, Arroyo-Martínez P, Cruz-Gutiérrez FV, Garrido-Hoyos SE, Gelover-Santiago S, López-Corzo R, Martín-Domínguez A, Pérez-Castrejón S, Quezada-Jiménez ML, Rivera-Huerta ML, Segura-Beltrán N. Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave de Proyecto TC 0815.3. Financiado por Fondo Metropolitano de la Laguna.
- Garrido-Hoyos SE, Piña-Soberanis M, Martín-Domínguez A. Remoción de arsénico mediante filtración directa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2010. Clave del Proyecto TC 1011.3. Financiado por el Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón.
- Piña-Soberanis M, Calderón- Mólgora CG, Garrido HS, Rivera-Huerta ML, Montellano-Palacios L, González-Herrera A, Martín-Domínguez A. Estudio y asistencia técnica para la licitación e instalación de 7 plantas potabilizadoras para remoción de arsénico

- en Torreón, Coah. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2013. Clave del Proyecto TC 1123.3. Financiado por el Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón.
- <sup>4</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Montellano-Palacios L, Pozo-Román F, Calderón-Mólgora CG, Piña-Soberanis M. Selección de trenes de tratamiento e ingeniería básica para potabilizar 26 fuentes de abastecimiento y elaboración de proyectos de seis plantas potabilizadoras en la región lagunera, estado de Coahuila de Zaragoza. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015. Clave del Proyecto TC 1408.3 Convenio de Colaboración SGAPDS-OCCCN-RL-14-050-F-CC. Financiado por CONAGUA.
  - <sup>5</sup> Pozo-Román F, González-Herrera A, García-López AJ, Montellano-Palacios L, Piña-Soberanis M. Selección de trenes de tratamiento e ingeniería básica para potabilizar 21 fuentes de abastecimiento y elaboración de proyectos de seis plantas potabilizadoras en la región lagunera, estado de Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015. Clave del Proyecto TC1409.3. Convenio de Colaboración SGAPDS-OCCCN-RL-14-040-F-CC. Financiado por CONAGUA.
  - <sup>6</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Durango. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2016. Clave del Proyecto TC1522.3. Convenio de Colaboración SGAPDS-OCCCN-RL-15-06-FED-CC. Financiado por CONAGUA.
  - <sup>7</sup> García-López AJ, González-Herrera A, Pozo-Román F, Piña- Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Coahuila de Zaragoza. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2017. Clave del de Proyecto TC1521.3. Convenio de Colaboración SGAPDS-OCCCN-RL-15-05-FED-CC. Financiado por CONAGUA.
  - <sup>8</sup> González-Herrera A, García-López AJ, Villegas-Mendoza IE, Piña-Soberanis M. Ingeniería de detalle, implementación, puesta en marcha e inicio de operación de la infraestructura que permita mejorar el abasto y la calidad de agua en la región lagunera en el estado de Coahuila. Etapa 2016. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2018. Clave de proyecto TC1632.3. Convenio de Colaboración SGAPDS-OCCCN-RL-16-15-FED-CC. Financiado por CONAGUA.
  - <sup>9</sup> EPA. Arsenic treatment technology, evaluation handbook for small systems. USA: United States Environmental Protection Agency EPA-816-R-03-014; 2003.

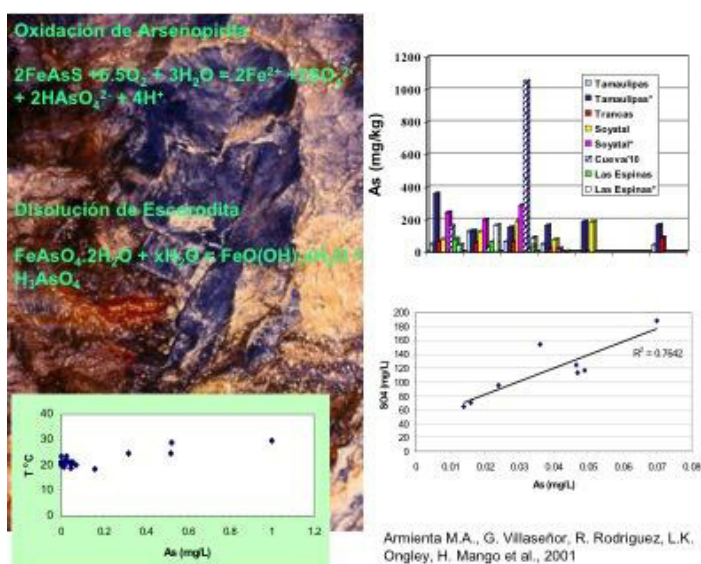
## CASO ZIMAPÁN, HIDALGO

María Aurora Armienta y Luz María Del Razo

El valle de Zimapán se encuentra localizado en la cuenca del Río Pánuco. La principal fuente de abastecimiento de agua potable la constituye el sistema acuífero local. Hasta la década de los 70's las necesidades de agua se satisfacían mediante la explotación de norias de 5 a 15 metros de profundidad. Cuando los volúmenes requeridos fueron mayores se realizaron excavaciones de pozos profundos, abasteciendo sus requerimientos de agua de diversos pozos profundos. Los pozos 1, 2, 5 y el distribuidor central de agua se encuentran en la Cabecera Municipal de Zimapán, el pozo 3 se localiza en el barrio de Tierra Colorada, el 4 en el barrio de El Muhi y el 6 en el barrio de Venustiano Carranza, todos ellos en este Municipio.

Como una consecuencia indirecta de la campaña para evitar que la epidemia de cólera, que se desarrolló en varios países latinoamericanos de 1991 a 1993, se hiciera presente en México, los habitantes de Zimapán, Hidalgo, se dieron cuenta de que pozos de abastecimiento de agua potable del poblado presentaban concentraciones de arsénico por arriba de la norma, que entonces era de 0.05 mg/L. Este conocimiento se debió a la circulación de un documento que listaba de manera anónima los contenidos de arsénico de diversos pozos profundos y norias particulares. Dichos análisis químicos fueron realizados en las muestras de agua que se colectaban para detectar la presencia de la bacteria del cólera. El Ing. Geólogo Jesús Ocampo, al conocer dicha información, acudió al Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para solicitar apoyo y verificar con muestras colectadas ex profeso y análisis del Laboratorio de Química Analítica del IGF, que en efecto las concentraciones listadas correspondían a arsénico y sus valores resultaban similares a los reportados en dicha lista. Como respuesta a esta solicitud y la de otros zimapenses, incluido el Presidente Municipal en aquel momento, Sr. Romualdo Sánchez Lozano<sup>†</sup>, los investigadores del IGF, Dr. Ramiro Rodríguez Castillo<sup>†</sup> y Dra. María Aurora Armienta Hernández, presentaron a los habitantes y autoridades de Zimapán el resumen de un estudio interdisciplinario que acababan de concluir sobre la presencia de cromo en el acuífero de León, Guanajuato. La información fue de mucho interés para los asistentes y después de intercambiar opiniones, les llevó a solicitar la realización por parte del IGF de una investigación similar sobre el problema del arsénico en la localidad, con objeto de identificar el origen de la contaminación por este elemento y proponer alternativas de solución. Con apoyo de la presidencia municipal y de la UNAM se inició en un corto plazo dicha investigación. Debido a la inquietud y temor que suscitó en los pobladores enterarse de la contaminación, el municipio distribuyó durante un tiempo agua con pipas que se abastecían de los pozos carentes de arsénico. Los estudios realizados por el IGF contemplaron, además de los análisis de arsénico en el agua, la determinación de iones mayores, otras especies menores como fluoruro y sílice, así como la revisión de la geología e hidrogeología de la zona y el análisis de los residuos mineros ubicados en las orillas de la cabecera municipal. Este último aspecto tuvo una importancia particular, ya que los pobladores atribuían a los mismos la presencia del arsénico en el agua potable. Los resultados de los análisis químicos se interpretaron en el contexto del sistema acuífero y se apoyaron en herramientas hidrogeoquímicas, se publicaron en un reporte al municipio de Zimapán y se informaron a las autoridades locales. En 1993 se evaluaron las mayores concentraciones en el pozo profundo El Muhi (1.09 mg/L), en el pozo Detzaní (0.52 mg/L) y en el pozo 5 ubicado en la calle de nombre plomo (0.526 mg/L). La combinación del agua de estos pozos se mezcla a un depósito central que distribuía el agua a la cabecera municipal. En dicho estudio, además

de identificar las distintas concentraciones de arsénico en el agua de pozos y norias, se llegó a la conclusión, con base en las características químicas y la hidrogeología de la zona, de que el arsénico presente en los pozos profundos utilizados para el suministro de agua potable procedía de una fuente natural y que el arsénico en el agua de las norias contiguas a los jales mineros utilizadas para limpieza, y en algunos casos para riego, era aportado por dichos residuos. También se concluyó que las menores concentraciones de arsénico medidas en varias de las norias del pueblo, se debía en su mayoría a la interacción del agua con el material granular del acuífero superior, aunque algunas de las norias habían sido contaminadas por los humos de las fundidoras que operaron en Zimapán hasta la década de los 40's del siglo XX. La presencia de diversos minerales con arsénico, principalmente arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), de manera natural en Zimapán<sup>1</sup> y el flujo del agua subterránea en el medio calizo, fundamentalmente por fallas y fracturas (muchas de ellas con dichos minerales), favorece la liberación del arsénico al agua y su aumento a través del tiempo (Figura 5.3).



**Figura 5.3.** Procesos que liberan arsénico de las rocas al acuífero calizo profundo. Se muestra una zona de oxidación, las concentraciones de arsénico medidas en diferentes tipos de rocas de la zona y la relación del contenido de arsénico con la concentración de sulfatos en distintos pozos

Además, el pozo El Muhi con mayor caudal y concentración de arsénico, presentó también concentraciones de fluoruro (2.1-2.3 mg/L) superiores a la norma para agua potable (1.5 mg/L). Se recomendó por tanto al municipio, enfocar los esfuerzos para evitar la exposición de la población hacia el establecimiento de sistemas de potabilización, pues se consideraba poco probable encontrar sitios adecuados para perforar nuevos pozos que proporcionarían agua suficiente y no contaminada. Posteriormente, para dar respuesta a las dudas de algunas autoridades estatales y pobladores sobre los efectos dañinos a la salud del arsénico, debido a su presencia en el agua, el grupo de investigación del IGF realizó un estudio epidemiológico preliminar que incluyó encuestas enfocadas a la detección de problemas de salud que se asociará a la exposición crónica a arsénico y análisis de la concentración de arsénico en cabello. Los resultados mostraron que, los 120 habitantes de Zimapán evaluados, tenían una concentración promedio de arsénico en el cabello de  $8.55 \pm 3.56$  mg/kg, siendo este valor 6 veces mayor al de referencia, además de presentar afectaciones típicas del arsénico en la piel como manchas (hipo e hiperpigmentaciones), así como engrosamiento de las palmas de las manos y plantas de los pies<sup>2</sup>. La Dra. Sylvia Vega del IMTA, reportó en 2000 durante el XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) que ingresaron al Instituto

Nacional de Cardiología un grupo de niñas de Zimapán con lesiones vasculares relacionadas con intoxicación crónica por arsénico<sup>3</sup>. En 1999 personal de la Secretaría de Salud, apoyados por investigadores del Departamento de Toxicología del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), evaluaron la concentración de orina de 125 habitantes en cuatro localidades de Zimapán (Aguacatito, Puerto Juárez, Barrón y Detzani), obteniendo concentraciones promedio de arsénico de 0.024, 0.014, 0.530 y 0.623 mg/L, respectivamente; las concentraciones en orina fueron muy similares a las evaluadas en el agua de abastecimiento de las localidades. El 92.5% de los residentes de las localidades de el Barrón y el Detzani, presentaron concentraciones urinarias de arsénico mayores a la concentración de referencia, siendo los participantes menores de 20 años los que presentaron las concentraciones mayores. Además, la presencia de hiperqueratosis palmar fue claramente asociada a la ingestión de agua y al tiempo de residencia en la localidad.

A partir de 2001, investigadores del Cinvestav-IPN apoyados por personal de la Jurisdicción Sanitaria 5 de Zimapán, han realizado una decena de estudios en la región mostrando en la población adulta varios efectos a la salud, como la presencia de lesiones pre carcinogénicas en la piel, riesgo a cáncer de vejiga y aumento de diabetes mellitus<sup>4</sup>. Por otra parte, en escolares de la región se ha documentado la disminución de la respuesta inmune, así como el aumento de alergias, enfermedades infecciosas, alteraciones vasculares y cardíacas<sup>5</sup>.

Para tratar de comprender la presencia de enfermedades complejas a causa de la exposición a arsénico, como las observadas en la región de Zimapán, se han realizado estudios epigenéticos que buscan explicar que, si un gameto ó un embrión es expuesto a situaciones de estrés, como la exposición a arsénico, puede estar predispuesto en su vida futura a padecer una enfermedad, encontrando diferencias significativas en los patrones de metilación del genoma del ADN en linfocitos de individuos no expuestos y expuestos a arsénico. Estos resultados muestran que un gran número de genes están epigenéticamente modificados en el ADN de los linfocitos de personas expuestas a arsénico y con signos cutáneos de arsenicosis, lo que apoya la evidencia experimental que la exposición a arsénico en etapas tempranas de la vida, como puede ser la exposición intrauterina, puede ocasionar efectos a la salud en la vida adulta debido a cambios heredados en el genoma<sup>6</sup>. Durante esta temporalidad los efectos a la salud han sido enfocados a la alta exposición de arsénico y no se han realizado estudios enfocados a la exposición alta de fluoruro.

Recién identificada la problemática en la región y para dar una solución a este problema, la Comisión Nacional del Agua en 1996 canceló el pozo del Muhi, pozo con mayor concentración de arsénico y realizó varias perforaciones en la zona para encontrar sitios alternos a los pozos contaminados, pero no se logró ubicar alguno con buena calidad cercano a la cabecera. Finalmente se logró perforar un pozo con buen caudal y ausencia de contaminación por arsénico, pero que tenía la desventaja de encontrarse en el municipio contiguo (Tasquillo) aproximadamente a 32 km de distancia y a un desnivel aproximado de 300 m por debajo de la cabecera municipal. Se construyó un acueducto e instaló un sistema de bombeo para llevar el agua hasta Zimapán (Imagen 5.3) pero no se contó con la anuencia del municipio de Tasquillo para explotar el pozo, por lo que fue necesario realizar otra perforación en un sitio cercano al mismo, pero dentro de los límites del municipio de Zimapán (pozo La Cruz). El sistema se puso en operación en el año 2004 (Imagen 5.4); sin embargo, aunque el agua es de buena calidad, el caudal es inferior al del pozo de Tasquillo y no es suficiente para abastecer a toda la población, además de que requiere un consumo alto de energía eléctrica para el bombeo.



**Imagen 5.3.** Acueducto de Tasquillo a Zimapán, el cual no se pudo poner en operación con el pozo perforado inicialmente



**Imagen 5.4.** Acueducto del pozo La Cruz, ubicado en los límites con Tasquillo, que transporta el agua a la cabecera municipal de Zimapán por bombeo.

Las investigaciones sobre la presencia, distribución y origen del arsénico en Zimapán han continuado por más de dos décadas, con la participación de investigadores y estudiantes de la UNAM, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, de varias universidades de Estados Unidos (con el apoyo de la National Science Foundation) y de otros países. Cabe destacar a la M.C. Guadalupe Villaseñor del Instituto de Geología de la UNAM y a la Dra. Lois K. Ongley<sup>†</sup> de Bates Collage, E.U.A., quienes han cubierto distintos aspectos de importancia científica para el desarrollo de acciones más efectivas para evitar la exposición de la población<sup>78,9</sup>. A lo largo de estos años se han buscado otras fuentes de agua no contaminada y se han probado distintos métodos de tratamiento. En 1996 se instaló una planta de las que habían sido utilizadas para purificar el agua durante el episodio del cólera en otros sitios y cuya efectividad para remover el arsénico había sido comprobada en estudios de laboratorio. En el año 1997, personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua instaló una planta piloto en el pozo 5 para remover arsénico utilizando dos filtros en serie, el primero empacado con arena, seguido de un filtro empacado con alúmina activada granular. Se partió de un agua con concentraciones de arsénico de 0.4 a 0.5 mg/L y de hierro entre 0.4 y 0.8 mg/L. En el filtro de arena se retuvo del 84 al 98% del hierro y del 56 al 67% del arsénico, el resto del arsénico se retuvo en el filtro de alúmina activada, alcanzando remociones del 99.9% al final del proceso<sup>10</sup>. Lamentablemente este sistema dejó de funcionar debido principalmente a la dificultad de contar con un encargado de su operación adecuada. La acción más reciente fue realizada bajo la presidencia municipal del Ing. José María Lozano, quien logró el apoyo federal para la instalación de tres plantas de tratamiento, la más grande para remover fluoruro además de arsénico (Imagen 5.5) y otras dos más pequeñas para la remoción por separado de arsénico (Imagen 5.6); la operación se inició en agosto del 2011.

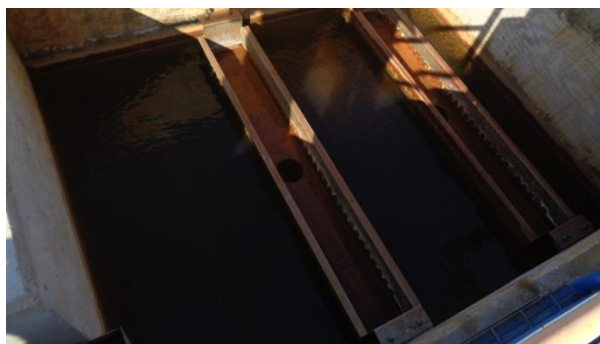
En las dos plantas destinadas únicamente a eliminar arsénico, el agua se trata en un primer paso con cloruro férrico y posteriormente se filtra por arena sílica y material adsorbente con dióxido de manganeso. En la planta para remover arsénico y fluoruro, el agua de alimentación pasa a un primer tratamiento mediante coagulación con cloruro férrico (Imagen 5.7), se transfiere a un sistema de microfiltración y posteriormente a un tanque con alúmina activada.



**Imagen 5.5.** Planta para la remoción simultánea de arsénico y fluoruro

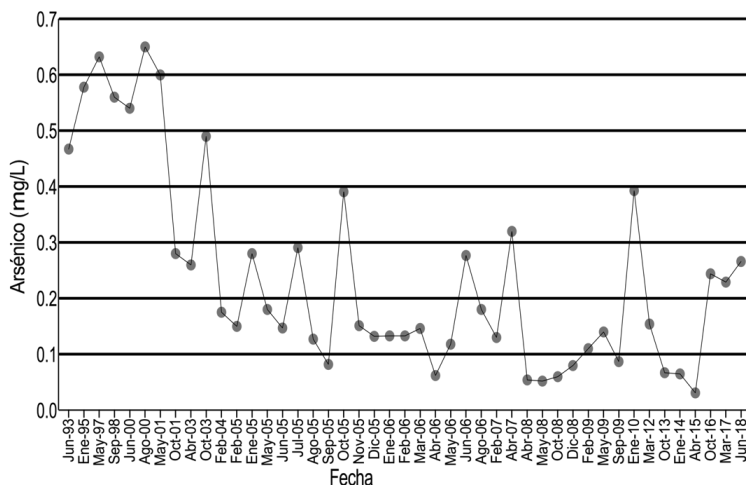


**Imagen 5.6.** Planta para la remoción de arsénico ubicada a un lado del tanque principal en la cabecera municipal



**Imagen 5.7.** Tanque del sistema de coagulación en la primera etapa del tratamiento del agua del pozo Muhi, para remoción de arsénico y fluoruro.

Las tres plantas se encuentran en operación, pero a pesar de que al inicio de su funcionamiento las concentraciones de arsénico y fluoruro cumplían con la normatividad para agua potable, actualmente solamente una de ellas disminuye la concentración de arsénico a lo estipulado por la norma de agua potable actual (0.025 mg/L). Esta situación se debe fundamentalmente a la falta de mantenimiento y suministro de insumos de manera regular, así como a que no hay un puesto permanente para un operador capacitado en su operación ya que el encargado ha cambiado con cada presidencia municipal. Por otro lado, se requiere dar limpieza y mantenimiento a los tanques de almacenamiento y distribución, así como renovar la tubería, ya que se ha encontrado experimentalmente que el arsénico se puede liberar de las paredes internas de las mismas. Otro problema es que el agua que se distribuye proviene de la mezcla de varios pozos, lo que resulta en concentraciones variables en el tiempo según el caudal de cada uno, monitoreos de los últimos 25 años muestran que existen fluctuaciones en las concentraciones de arsénico que abastecen a la cabecera municipal, que van desde 0.040 hasta 0.650 mg/L; una muestra colectada en junio de 2018, a la salida del tanque principal, con 0.266 mgAs/L de agua. Aunque la problemática de exposición a arsénico en el agua de bebida es considerablemente menor a la que existía en los años 90, las concentraciones del agua potable aún están fuera del límite considerado seguro (Figura 5.4).



**Figura 5.4.** Concentraciones de arsénico en agua de abastecimiento de la Cabecera Municipal de Zimapán. Las muestras de agua y el análisis de las mismas se realizaron en los laboratorios del IGF de la UNAM y en el Departamento de Toxicología del Cinvestav-IPN.

Se sabe que el actual Presidente Municipal, Lic. Erick Marte Rivera, ha realizado acciones para bombear agua de otro pozo en la comunidad de San Miguel Tetillas, al sureste de la cabecera, pero que se ha enfrentado a problemas por el suministro de energía eléctrica requerida para el bombeo.

Finalmente, aunque ha habido avances, todavía no se soluciona el problema del abastecimiento de agua para que cumpla con la norma para arsénico en Zimapán, pero actualmente se requieren medidas más sencillas y económicas que las que se necesitaban hace 25 años para lograrlo. Debido al problema de salud que implica la exposición continua de la población a concentraciones muy superiores a la norma para agua potable y en algunas zonas también a fluoruro es urgente dar una solución definitiva a esta problemática.

## Referencias

- 1 Armienta MA, Villaseñor V, Rodríguez R, Ongkey LK, Mango H. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 40, 4-5 (2001).
- 2 Armienta MA, Rodríguez R, Cruz O. Arsenic Content in Hair of People Exposed to Natural Arsenic Polluted Groundwater at Zimapán, México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 9:583-589 (1997).
- 3 Vega Gleason S. Riesgo Sanitario Ambiental por la presencia de arsénico y fluoruro en los acuíferos de México. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/104.pdf>
- 4 Jimenez-Cordova MI, Barbier O, Cardenas Gonzalez M, Del Razo LM. Estudios Realizados en México sobre Efectos a la Salud por la exposición de arsénico y fluoruro. En *Arsénico y Fluoruro en Agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México* ed XXXXX 2018.
- 5 Limón-Pacheco JH, Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Sánchez-Retana IM, Gonsebatt ME, Del Razo LM. Potential co-exposure to arsenic and fluoride and biomonitoring equivalents for Mexican children. *Ann. Glob. Heal.* 84, 1–17 (2018).
- 6 Smeester L, Rager J, Bailey KA, Guan X, Smith N, Garcia-Vargas G, Del Razo LM, Drobna Z, Kelkar H, Styblo M, Fry RC. Epigenetic Changes in Individuals with Arsenicosis. *Chemical Research and Toxicology* 24:165-167 (2011).
- 7 Armienta MA, Villaseñor V, Rodríguez R, Ongkey LK, Mango H. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 40, 4-5 (2001).
- 8 Ongley LK, Sherman L, Armienta A, Concilio A, Ferguson-Salinas C. Arsenic in the soils of Zimapán, Mexico, *Environmental Pollution*, 145, 793-799 (2007).
- 9 Sracek O, Armienta MA, Rodríguez R, Villaseñor G. Discrimination between diffuse and point sources of arsenic at Zimapán, Hidalgo state, Mexico, *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 329-337, (2010).
- 10 Rivera Huerta M de L, Cortés Muñoz JE, Piña Soberanis M, Martín Domínguez A. Remoción de hierro y arsénico de agua para consumo humano mediante precipitación y adsorción en Zimapán, Hidalgo, México. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, (2000). <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/trataqua/ii-066.pdf>

## CASO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

María Deogracias Ortiz Pérez, María Catalina Alfaro de la Torre, Ana Cristina Cubillas Tejeda, Mauricio León Arce y Lorena Anaya González

### Introducción

La contaminación del agua de naturaleza geológica es resultado de la interacción natural que tiene el agua subterránea con algunas de las rocas volcánicas especialmente con su matriz vítrea, que se encuentran ampliamente diseminadas en la Sierra Madre Occidental y que constituyen algunos de los principales acuíferos con que se abastece de agua a la población, principalmente en la zona centro y noroeste del país. De esta manera, la disolución de sustancias del material geológico hace que elementos como fluoruro y arsénico se encuentran presentes en el agua subterránea que se distribuye, como agua potable.

Desde los años 60's, una serie de estudios, encaminados a evaluar las concentraciones de fluoruros y arsénico en agua para consumo humano y los efectos generados por esta exposición, han sido efectuados por investigadores de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en varios Estados en México.

### Ciudad de San Luis Potosí

En el año 1965, en la ciudad capital del estado, se reportó que el agua “potable” de tres pozos (Muñoz, Química Potosí y A.P. Green) contenía concentraciones de fluoruro de 3.4 mg/L en promedio<sup>1</sup>. A partir de este primer reporte se tomó conciencia que el agua suministrada para el consumo humano podía ocasionar efectos a la salud. En 1974, se publicó que el agua potable proveniente del pozo ubicado en el Jardín de la colonia San Felipe, contenía concentraciones de fluoruro hasta de 11 mg/L y por esta razón fue clausurado<sup>2</sup>.

Para el 2006, el agua subterránea constituía el 92% del total con que se surtía a la población. A partir del año 2014, una parte de la ciudad se abastece de agua proveniente de la presa El Realito localizada en la Sierra Gorda y que fue construida ex profeso para suministrar de agua en parte a la Ciudad de San Luis Potosí (SLP). El Organismo Operador de la ciudad, Interapas, indica en 2013 que “al incorporarse el agua de la presa El Realito con 1,000 litros por segundo, los pozos con niveles altos de fluoruro (40 de 120) dejarán de operar, por lo que se resolverá en definitiva dicha problemática”<sup>3</sup>. La cobertura de agua prometida aún no se ha alcanzado por diferentes razones, entre las que destaca que no se desarrolló el Programa de Mejora Integral de Gestión del Interapas que contemplaba obras y acciones de infraestructura hidráulica y de gestión comercial, las cuales permitirían modernizar el sistema hidráulico de la zona metropolitana de SLP, para recibir adecuadamente los 1,000 litros de agua proveniente de la presa El Realito. Además, la cantidad de pozos contaminados no corresponde al 30% del total reportado por Interapas, sino al 64%. Así las cosas, hasta el momento, aún con la Presa El Realito, no se ha podido resolver el problema de mala calidad del agua para el consumo humano en la ciudad capital.

En 2006 la UASLP entregó al INTERAPAS, la información de las concentraciones de fluoruro y arsénico en el agua de 91 pozos profundos de la ciudad de SLP y 35 de la zona conurbada, que surten de agua para uso y consumo humano a la población. De acuerdo con lo que se reportó, el arsénico

disuelto se encontró en un rango de 0.002 a 0.0148 mg/L y la concentración de fluoruro en un rango de 0.35 a 4.16 mg/L. La mayor contaminación se encuentra localizada en el suroeste, oeste, sureste y noroeste de la ciudad (Figura 5.5). De los 91 pozos muestreados de la ciudad de SLP, ningún pozo sobrepasa de 0.025 mg As/L, límite máximo permisible establecido en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127)<sup>4</sup> y 53 pozos (58.24%) exceden de 0.010 mg As/L, la concentración considerada por la Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>5</sup>. Si se considera el valor recomendado por la OMS, aproximadamente 390 000 habitantes pueden estar expuestos a agua contaminada con arsénico.

Referente al fluoruro, el 71.43% de los pozos (70) en la ciudad de SLP contienen concentraciones superiores a 1.5 mg/L (NOM-127) y el 84.62% son mayores a 0.7 mg/L; este último valor ha sido la concentración óptima de fluoruro recomendada para México, con base en la temperatura ambiente promedio y a otros factores como alimentación y consumo de leche en polvo reconstituida con agua de la llave.

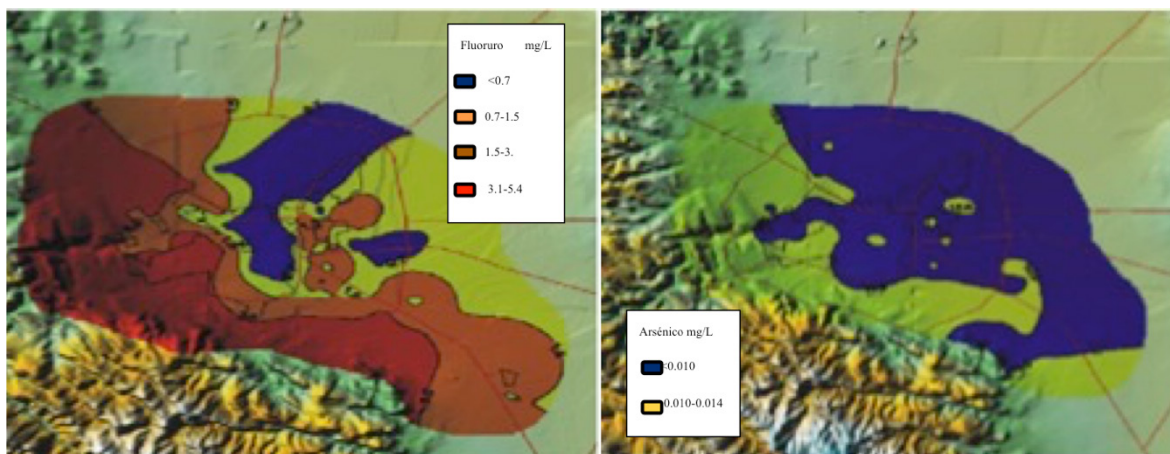


Figura 5.5. Mapas de isoconcentración para fluoruro y arsénico en agua subterránea por rangos de concentración. Ciudad de SLP y área conurbada 2004-2005<sup>6</sup>.

En Soledad de Graciano Sánchez con un total de 28 pozos, el 35.71% (10 pozos) excede de 1.5 mg F/L y ninguno sobrepasa la concentración de 0.025 mg As/L (NOM-127) aunque el 25% de los pozos (7) exceden 0.010 mg As/L (valor de la OMS). Un análisis de datos permitió establecer que el arsénico del agua subterránea correlaciona positivamente con la de fluoruro y con la temperatura del agua, medida a la descarga del pozo, lo cual es significativo y podría apuntar hacia un origen común de los contaminantes<sup>6</sup>.

Dicha asociación no es sorprendente porque el arsénico y fluoruro generalmente provienen del mismo origen de rocas volcánicas y pueden formar compuestos de coordinación uno con otro<sup>7</sup>.

En 2006, con base a los resultados de la calidad del agua, se estimó que en la ciudad capital y zona conurbada alrededor de 550,000 habitantes podrían estar expuestos por el consumo de agua con concentraciones de fluoruro superiores a 1.5 mg/L. Tomando en cuenta la concentración de 0.7 mg F/L esta cifra se eleva a 660,000 habitantes aproximadamente<sup>6</sup>.

En la Ciudad y zona conurbada se estimó en el 2006, que alrededor de 550,000 habitantes pueden estar expuestos a niveles no permisibles de fluoruro por este consumo de agua (mayor de 1.5 mg F/L). Tomando en cuenta los valores de 0.7 mg F/L esta cifra se eleva a 660,000 aproximadamente<sup>6</sup>.

## Fluoruro en agua embotellada

Al evaluar la concentración de fluoruro en orina en población que consumía agua embotellada y agua de la llave, se observó que algunas personas que tomaban y cocinaban alimentos con agua embotellada presentaban concentraciones altas de fluoruro en orina. En Septiembre de 1998, se inició por parte de la UASLP el monitoreo de la concentración de fluoruro en agua de las embotelladoras registradas ante Servicios de Salud en la ciudad. Los resultados mostraron que de 19 marcas de agua embotellada que contaban con un registro ante esta dependencia, el 64% de ellas presentaban cifras por arriba de la NOM-041, que era de 0.7 mg/L. El 47% de ellas presentaba cifras arriba de 3.0 mg/L. Estos resultados fueron entregados a Servicios de Salud de SLP y gracias a su intervención, para el año 2002 se logró disminuir hasta un 15 % las embotelladoras que presentaban concentraciones por arriba de 0.7 mg/L. En el muestreo realizado en enero de 2005, se tomaron 125 muestras puntuales de agua entre purificadoras y rellenadoras<sup>8</sup>. De ellas, sólo 11 presentaron una concentración de fluoruro mayor a 1.5 mg F/L, concentración máxima permitida por las NOM 127<sup>9</sup>.

## Concentración de fluoruro en bebidas carbonatadas (refrescos)

Por ser una fuente de exposición adicional, en el año de 1999 se analizaron refrescos de 20 embotelladoras pertenecientes a los Estados de SLP, Aguascalientes, Durango, Puebla, Querétaro, México y Nuevo León. En los resultados se encontraron valores promedio desde 0.2 hasta 5.3 mg de fluoruro/L. El factor que explica esta variación, es que la concentración de fluoruro depende de la contaminación del agua en la localidad donde se elabora el producto, aunque puede venderse en otras poblaciones en las cuales los niveles de fluoruro sean bajos, representando un riesgo adicional para esta población. Gracias a la trasmisión de estos resultados, actualmente, las embotelladoras implementaron sistemas de remoción del fluoruro en el agua para la producción, y el refresco se expende a concentraciones por debajo del límite máximo permisible<sup>10</sup>.

La difusión de todos estos resultados a la población potosina, ayudó a que disminuyera la prevalencia de fluorosis dental en los infantes. Es importante señalar que aunque se viva en una zona con niveles por debajo de 1.5 mg F/L, la afectación de la fluorosis dental se presenta en la población. Lo anterior es debido a que se consume también agua de otras zonas donde la concentración de fluoruro es alta, y por los factores que incrementan su nivel de exposición, como hervir el agua, leche reconstituida con agua hervida, mala alimentación, así como el consumo de alimentos preparados con esta agua, factores muy importantes que deben darse a conocer a la población.

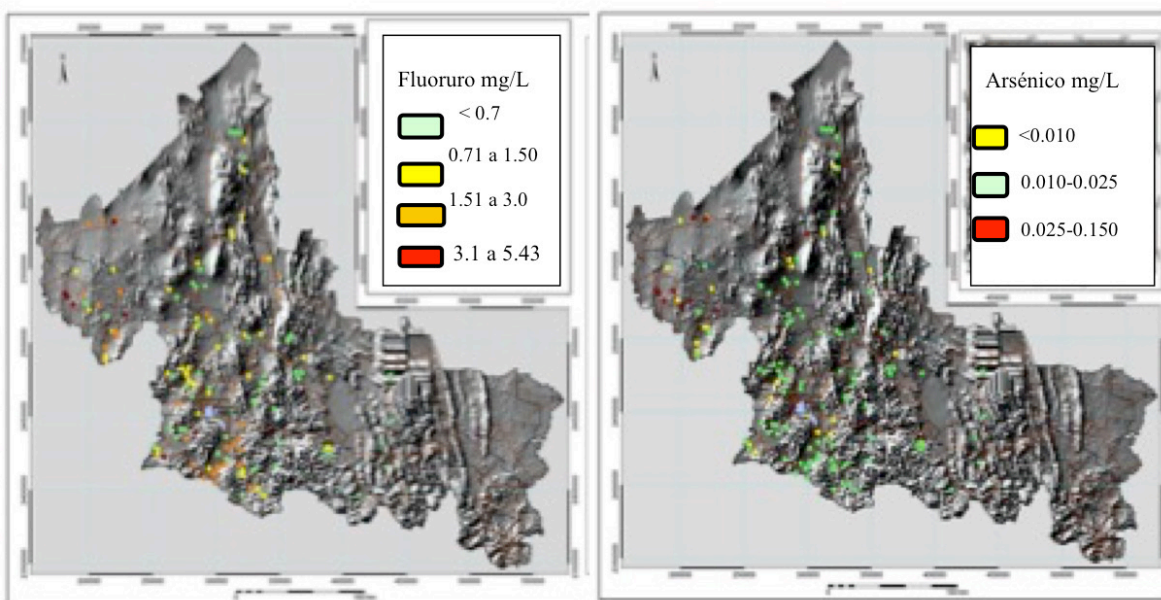
## Estado de San Luis Potosí

Aunque la región más estudiada ha sido la capital del Estado, se determinó que debido a la característica geológica de las regiones comprendidas en las Provincias de la Mesa del Centro y de la Sierra Madre Oriental, existía la posibilidad de que el agua subterránea se encontrara contaminada por fluoruro y/o arsénico, además que a esa fecha no se había determinado la concentración de arsénico en varias localidades. De esta manera se seleccionaron las zonas Media, Altiplano y Centro del Estado de SLP para su evaluación. La zona Huasteca se excluyó por estar comprendida en la Provincia de la Llanura Costera del Golfo que está constituida principalmente por rocas sedimentarias de origen marino. Así, durante 2004 y 2005 se cuantificaron fluoruro y arsénico en el agua distribuida y utilizada para el consumo humano, proveniente de pozo profundo, en los municipios localizados en estas regiones.

Se recolectaron un total de 237 muestras de agua de pozo correspondientes a 157 localidades con más de 500 habitantes ubicadas en 33 municipios de las zonas de estudio y con la información

de estos municipios, se evaluó el riesgo en salud para la población por la exposición a fluoruro y/o arsénico (Figura 5.6).

Se encontró que el 28.5 % de las muestras sobrepasaban el límite máximo permisible para fluoruro (1.5 mg/L) que establece la NOM-127<sup>4</sup> y el 11.1 % lo sobrepasan para arsénico (0.025 mg/L). Las comunidades que presentan concentraciones de fluoruro arriba de lo permisible están ubicadas en 13 municipios que son: Charcas, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Salinas de Hidalgo, Santa María del Río, Santo Domingo, Villa de Arriaga, Villa de Guadalupe, Villa de Ramos, Villa de Reyes, Villa de Zaragoza y Villa Juárez. Para el arsénico, las comunidades se encuentran en 8 municipios: Ahualulco, Charcas, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, Salinas de Hidalgo, Santo Domingo, Villa de Guadalupe y Villa de Ramos. Se estimó para ese año, que alrededor de 75,000 habitantes tienen el problema de que el agua de consumo contiene concentraciones no permisibles de estos contaminantes: sin embargo, atendiendo a la recomendación de la OMS de 0.010 mg/L para arsénico y considerando que el valor óptimo para fluoruro en México debería de ser de 0.7 mg/L, esta cifra sería de alrededor de 135,000 habitantes, que corresponde al 41% de la población total de estos municipios, para el año 2006<sup>11</sup>.



**Figura 5.6.** Mapas del Estado de San Luis Potosí con la concentración de fluoruro y arsénico en las 237 muestras de agua de pozo para consumo humano en 33 municipios<sup>11</sup>

En 219 de las 237 muestras de agua se realizó el análisis fisicoquímico. Con esta información fue posible establecer los tipos de familias de agua. Se observa que predominan principalmente las aguas del tipo bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica. Además se encontró que existe una asociación positiva significativa entre fluoruro y arsénico, lo cual sugiere que los elementos pueden estar asociados en el mismo mineral<sup>11</sup>. Con la información de los 33 municipios, se evaluó el riesgo en salud por la exposición a estos contaminantes, siendo de 1 hasta 35 veces el riesgo de presentar hiperpigmentación, queratosis y posible complicación vascular por la exposición a arsénico. En tanto que para fluorosis dental el riesgo es de 1 a 7 veces. Este último dato fue estimado en la población infantil, ya que la fluorosis dental se hace evidente cuando la población se expone al fluoruro en la etapa de formación del diente<sup>10</sup>.

La información recabada hasta el año 2006 sobre las concentraciones de fluoruro y arsénico en las muestras de agua analizadas y el demostrar la exposición mediante la evaluación de estos elementos en orina como biomarcador de exposición fue relevante por lo que se entregó el

documento a las autoridades de salud y a las presidencias municipales incluidas en el estudio, en varios sitios se dieron pláticas informando a la población, para mejorar su calidad de vida. Además, la información fue entregada en el año 2006 al Gobernador del Estado, C.P. Marcelo de los Santos Fraga, quien determinó la instalación de 10 purificadoras de agua en las localidades con mayor exposición, mediante la Secretaría de Desarrollo Social y Regional. A partir de esta medida, se trabajó en la difusión hacia la población donde se instalarían estas plantas, para que entendieran el problema de salud que tenían, la causa y los cambios que necesitaban efectuar.

En el período de 2013-2015 se colectaron muestras en todas las fuentes de abastecimiento de agua que utiliza la población en los 15 municipios del Altiplano Potosino. Estas fuentes incluyeron pozos, ollas de agua, piletas de almacenamiento e incluso bordos en localidades entre 500 y 2500 habitantes, que abarcó poblaciones rurales y siete cabeceras municipales. Las muestras se colectaron en 77 fuentes de abastecimiento; se visitaron ocho poblaciones rurales con menos de 500 habitantes a petición de las autoridades municipales. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que marca la NOM127<sup>4</sup>. Los resultados obtenidos permitieron determinar que la contaminación con fluoruro y arsénico en muestras de pozos profundos representó el 19% de los abastecimientos analizados (Salinas, Villa de Arista, Villa de Ramos, Villa Hidalgo, Villa de la Paz, Matehuala, Guadalcázar, Vanegas, Venado, Charcas, Santo Domingo). Las concentraciones determinadas variaron en el rango de 0.1 a 4.7 mg/L para fluoruro encontrando la concentración más alta en el pozo profundo de la comunidad de El Leoncito, Villa Hidalgo. En el caso del arsénico, las concentraciones variaron entre 0.0005 y 0.141 mg/L, encontrando los valores más altos en agua de pozos profundos en Villa de Ramos (Sauz de Calera) y en Santo Domingo (Santa Matilde, Providencia e Illescas)<sup>12</sup>.

Adicionalmente a fluoruro y arsénico, el agua en algunas localidades muestra contenido alto de sales (sulfatos, cloruros, sodio) en localidades de 9 municipios y presencia de plomo y aluminio en un número alto de sitios; los resultados para estos dos últimos elementos deben comprobarse en un muestreo dirigido, utilizando técnicas más sensibles como el de espectrometría de masas acoplado a plasma inductivo (ICP-MS). Estas condiciones ponen en evidencia que el problema de la calidad de las fuentes de agua a las que la población tiene acceso, al menos en la zona Altiplano es complejo y requiere de acciones urgentes y concretas dirigidas a proveer alternativas de tratamiento en el suministro de agua potable. La contaminación bacteriológica se detectó principalmente en muestras de pozos someros y piletas de almacenamiento<sup>12</sup>.

### La comunicación de riesgo como estrategia indispensable de la solución

La comunicación de riesgos (CR) es un proceso con bases científicas, que busca, a través del diálogo, persuadir, informar e influir a la población, objeto de la misma, sobre todos aquellos factores y amenazas que ponen en peligro la salud<sup>13</sup>. La CR además del conocimiento centralmente informativo, también es educación, y la educación es transformación mediante el conocimiento. Según Paulo Freire<sup>14</sup> para hacer posible el proceso de educación es necesario llegar a un “acuerdo de significación”. En otras palabras, la expresión verbal de uno tiene que ser percibida por el otro en una imagen significativa común. Esto quiere decir que, si el profesional no entiende el universo en el cual trabaja, tenderá a transmitir conocimientos producidos en su propia realidad específica (académica) para un grupo de población bien diferenciado, con lo cual promueve el fracaso de las prácticas de educación y transgrede y descalifica las normas culturales locales o tradicionales. Además, la CR depende de la confianza y la credibilidad, las cuales se alcanzan mostrando compromiso, competencia, empatía, apertura y honestidad<sup>15</sup>. La CR es una estrategia que debería ser tomada en cuenta por los encargados de tomar decisiones en pro de la salud de la población, ya que ayuda a conocer lo que la población piensa, cree, opina, siente respecto a un riesgo, lo que puede ayudar a buscar que las personas se informen respecto a un riesgo que puede poner en peligro su salud, o

puede ser una estrategia que promueva el cambio de hábitos, conductas o creencias, para que las personas puedan tener un mejor cuidado de su salud y bienestar<sup>15</sup>.

En un programa de CR es importante tener en mente los siguientes elementos: a) la fuente: personas que transmiten el mensaje, la información y que promueven el diálogo; b) la población dialogante: grupo social con quien se establece la CR; c) el mensaje: aquello que se desea informar; d) los medios o canales de comunicación: mecanismos a través de los cuales se establece la comunicación con la población. Estos elementos deben ser adaptados con base al análisis del escenario sociocultural en el cual se llevarán a cabo las acciones, por lo que el proceso no debe ser unidireccional, sino que conlleva diálogo, es decir se trata de un proceso en dos sentidos.

Para diseñar e implementar un programa de CR efectivo, se han propuesto una serie de pasos (Figura 5.7) y recomendaciones, los cuales permiten el diseño de estrategias contextualizadas<sup>15,16</sup>. Las actividades y los mensajes deben ser diseñados con la consideración de factores sociales y culturales de la comunidad dialogante, así como con los propios de las múltiples disciplinas. De esta manera la información recibida no sólo estimulará procedimientos de memoria o de retención de información sin un contexto, sino que, por el contrario, articulados a sus problemáticas significativas generará cambios conceptuales en los sujetos que permitirían ser la base del autoconocimiento y la autorresponsabilidad de sus hábitos y conductas referidas al problema de salud abordado.

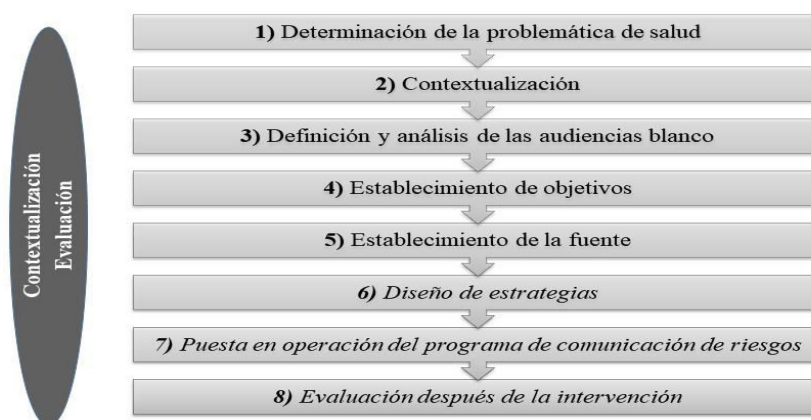


Figura 5.7. Pasos de la Comunicación de Riesgos

## El Fuerte

En la localidad El Fuerte, municipio de Santa María del Río, zona centro del estado, se instaló la primera planta purificadora en octubre de 2007. Es una comunidad rural con 1744 habitantes y un alto grado de marginación<sup>17</sup>. Cuenta con un pozo que distribuye el agua a toda la población, cuya concentración de fluoruro es de 2.91 mg/L. La prevalencia de la fluorosis dental es de 98 %, presentando el 37% de ellos un grado severo (V en el índice de Dean). Se adquirió responsablemente el compromiso de informar a la población sobre la contaminación natural del agua mediante el diseño, implementación, y evaluación de un Programa de Comunicación de Riesgos como estrategia de intervención simultánea a la instalación de la planta, ya que de esta manera, la población tenía una posibilidad de consumir a bajo costo el agua de la purificadora. Aunque la CR se centró en los niños de la comunidad, se tomó en cuenta la participación de padres de familia y profesores, como parte fundamental en la educación de los niños. Se utilizaron diferentes canales infantiles

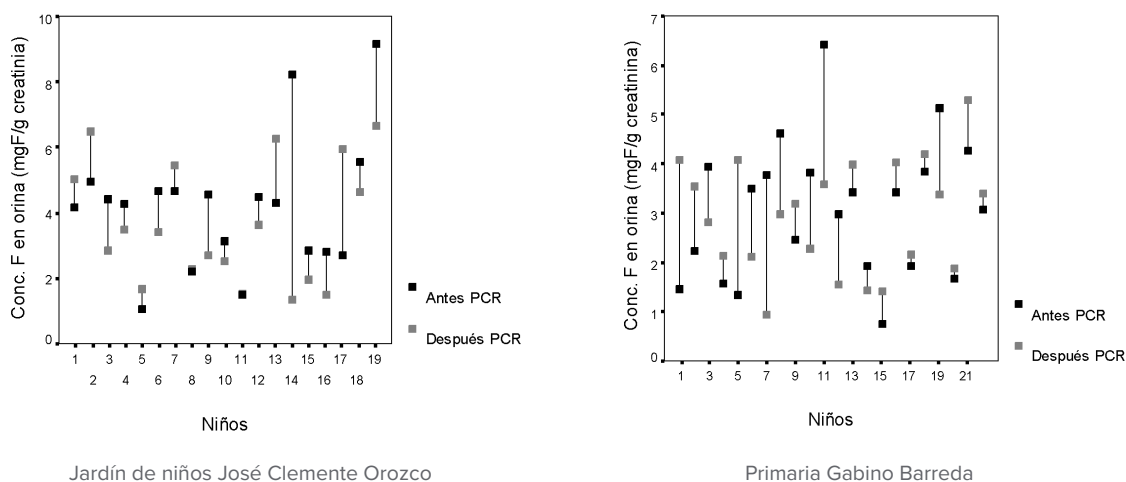
de comunicación, tales como experimentos didácticos, pláticas, proyección de videos, cuentos de iluminar, juegos y concursos. Los profesores estuvieron presentes en todas las actividades realizadas con los niños; y a los padres de familia se les dio la información por medio de pláticas.

Se realizó un diagnóstico sobre percepción de riesgos y conocimientos relacionados con la contaminación del agua, así como de hábitos de consumo de agua en el que participaron 175 niños. Además se determinaron las concentraciones de fluoruro en orina en 41 niños. La evaluación se realizó con actividades como el análisis de dibujos, cuestionarios aplicados a niños y padres de familia y un monitoreo biológico en dos etapas que fueron al inicio y al término de la CR<sup>18,19</sup>.

La evaluación posterior se realizó seis meses después de la intervención. Se encontró que la mayoría de los participantes integraron conocimientos, percibieron al fluoruro como un riesgo y refirieron beber y cocinar con agua purificada. Al evaluar la exposición, mediante fluoruro en orina, se encontró una disminución solo en 21 niños, con un decremento no significativo de 3.59 a 3.26 mg F/g creatinina. La investigación mixta permitió deducir la razón por la cual no disminuyeron los niveles de fluoruro en la mayoría de los niños y plantear estrategias futuras para alcanzar los objetivos<sup>17-19</sup>. Una de las causas es que aun cuando las familias cambiaron el hábito de consumir a agua de la llave por agua purificada, seguían cocinando con el agua de la llave.

En la Figura 5.8, se muestra el comparativo de cada niño, en el que se evaluó la exposición mediante el biomarcador de exposición fluoruro en orina, antes y después del mensaje de la CR. Cada padre de familia pudo observar la progresión de su hijo cuando se cumplió o no en casa, con el mensaje sobre la utilización de agua embotellada para consumo y cocción de los alimentos<sup>20</sup>.

Por el interés mostrado por las madres de familia, se les propuso trabajar con un grupo de 12 niños menores de seis meses. En este proyecto longitudinal, se realizan cuatro visitas por año, para hacer recomendaciones sobre la salud bucal, limpieza de encías, alimentación, consumo de agua, hábito de masticación y respiración de estos pequeños.



**Figura 5.8.** Concentración de fluoruro en orina (mg F-/ g creatinina) en niños que participaron en los dos muestreos, antes y después de la aplicación del Programa de Comunicación de Riesgo (PCR), agrupados por escuela.

## Salitral de Carrera

En el municipio de Villa de Ramos, 13 de 15 localidades estudiadas presentaron concentraciones de arsénico y/o fluoruro en agua por arriba de los niveles permisibles. Salitral de Carrera es donde se encontraron los más altos para ambos elementos, siendo de 5.8 mg/L para el fluoruro y de 0.170 mg/L de arsénico en el agua. Esta localidad cuenta con 3669 habitantes y un grado de marginación alto<sup>21</sup>.

En octubre de 2008 se realizó una plática de información con los padres de familia y maestros del jardín de niños y la escuela primaria. Se aplicó un cuestionario para conocer el estado nutricional y socioeconómico de la población del estudio, además de conocer la información que tienen los padres de familia sobre la contaminación en su comunidad y de donde procede el agua de consumo y preparación de alimentos. El Programa de Comunicación de Riesgo se adelantó a la instalación de la planta de agua purificada por la necesidad de informar a la población sobre el daño de esta exposición.

Para determinar la exposición se contó con un total de 215 participantes de 5 a 12 años de edad. En los resultados de fluoruro en orina ajustados por gravedad específica, se encontró una mediana de 4.2 mg F/L y un rango de 0.62 hasta 14.99 mg/L, donde 96% de los individuos presentan concentraciones en orina mayores a 1.6 mg/L, 52% mayor a 4 mg/L y el 7.4% se encuentran por encima de 8 mg/L, lo que indica el serio problema de esta población infantil. En Salitral de Carrera el porcentaje de niños que presentan fluorosis dental es del 98%, la mayoría de ellos (71%), grado V del Índice de Dean. Respecto al arsénico, se obtuvo una mediana de 0.025 mg As/L y rango de 0.007 a 0.155 mg As/L<sup>19</sup>.

Aunque la percepción del problema gracias a la CR fue positiva, desafortunadamente, en esta población no se pudo realizar la evaluación meses después de la implementación del programa, debido a la inseguridad de la región y el peligro de llevar estudiantes a esta zona.

La instalación de plantas purificadoras conlleva la responsabilidad del mantenimiento y seguimiento constante. En el caso de Salitral de Carrera las planta purificadoras instaladas funcionaron adecuadamente por poco tiempo por la falta de mantenimiento de la planta y con la alta salinidad del agua, los filtros se saturaron rápidamente, con la consecuente ineficacia en el proceso.

Actualmente, la Comisión de Hábitat, Medio Ambiente y Sostenibilidad (CHMAS) en colaboración con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) están planteando una nueva iniciativa con el propósito de atender, prevenir y mitigar los efectos en salud derivados del consumo de agua contaminada por arsénico y fluoruros en la región de la Cuenca de San Luis Potosí. A raíz de las experiencias documentadas, se seleccionaron La Reforma y Salitral de Carrera como sitios para la ejecución de un proyecto piloto que funcionará como base para la expansión a otras comunidades.

El proyecto pretende rescatar experiencias pasadas y encaminarlas a los nuevos retos que enfrentan las comunidades. Así, la implementación de modelos de captación de agua de lluvia, la participación activa de la comunidad y los procesos de comunicación y educación para la salud, constituirán una estrategia integral y eficiente para prevenir la exposición a contaminantes. Además, esta nueva línea de acción, representará una nueva oportunidad para construir vínculos entre diferentes actores sociales, facilitando la continuación y seguimiento de las experiencias que se estuvieron desarrollando en la zona a partir del 2003.

## Referencias

- 1 Villalobos CI 1965. Pruebas preliminares sobre el contenido de fluoruros en aguas disponibles en la Ciudad de San Luis Potosí. Contribución No 36 Instituto de Zonas Desérticas. UASLP (1965).
- 2 Villalobos CI y Díaz de León E. 1983. El Contenido de Fluoruros en Agua de Consumo de la Ciudad de San Luis Potosí (1974). Folleto Técnico No. 40. Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP, Diciembre, 31-36 (1983).

- <sup>3</sup> [http://www.interapas.mx/files/gestion\\_agua/GESTION\\_DEL\\_AGUA\\_2013.pdf](http://www.interapas.mx/files/gestion_agua/GESTION_DEL_AGUA_2013.pdf)
- <sup>4</sup> 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". Diario Oficial de la Federación. 22 de noviembre del 2000.
- <sup>5</sup> [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/gdwq3/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq3/es/)
- <sup>6</sup> Rodríguez Landín, LE. Parámetros Físicoquímicos y concentración de fluoruro y arsénico en el agua de los pozos de la Ciudad de San Luis Potosí y Zona Conurbada. Alternativa de tratamiento: adsorción de fluoruro y arsénico en la interfase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> activada/ solución acuosa. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Directora Ortiz-Pérez MD, UASLP (2006).
- <sup>7</sup> Korte N. Naturally occurring arsenic in groundwaters of the midwestern United States. *Environ. Geol. Water Sci.*, 18(2):137-141 (1991).
- <sup>8</sup> Guevara Ruiz P, Ortiz-Pérez MD. Modificación del Método Potenciométrico con Electrodo Ión Selectivo para la Cuantificación de Fluoruro en Agua. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (2) 87-94 (2009).
- <sup>9</sup> Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2002. Productos y Servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. 1 Agosto 2002.
- <sup>10</sup> Carreón Aguiñaga MS. Determinación Analítica de Fluoruros en las Bebidas Carbonatadas (refrescos) que se consumen en la Ciudad de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura de Químico Farmacobiólogo. Directora Ortiz-Pérez MD. UASLP (1999).
- <sup>11</sup> Bocanegra Salazar, M. Evaluación de riesgo en salud por la exposición a fluoruro y arsénico en agua de pozo para consumo de las zonas altiplano, centro y media del Estado de San Luis Potosí. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Directora Ortiz-Pérez MD UASLP (2006).
- <sup>12</sup> Tejada González JC. Propuesta metodológica basada en la evaluación ambiental estratégica para la planificación del aprovechamiento sustentable del agua y los recursos naturales en zonas marginadas y con potencial de desarrollo. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales. Dra. Ma Catalina Alfaro de la Torre, Directora, Dr. Pedro Medellín Milán, Co-director. UASLP (2017).
- <sup>13</sup> National Research Council. Improving risk communication. National Academy Press, Washington DC, pg. 21 (1989). <http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309039436>. Consultado el 8 de agosto de 2018.
- <sup>14</sup> Freire P. ¿Extensión o Comunicación? La concientización en el medio rural. Buenos Aires: Editorial Siglo XXI, 109 pp. (1973).
- <sup>15</sup> Moreno-Sánchez AR, Cubillas-Tejeda AC, Guerra-García A, Peres F. Risk communication in Latin America. In L. A. C. Galvao, J. Finkelman, and S. Henao (Ed.), *Environmental and Social Determinants of Health* 335-360. Pan American Health Organization. Washington, DC: PAHO (2016).
- <sup>16</sup> Cubillas-Tejeda AC & González-Mares MO. La comunicación de riesgos como estrategia de intervención para mejorar la salud ambiental en poblaciones vulnerables. In A. Mendieta P. Testas Ed. ¿Legitimidad o reconocimiento? Las investigadoras del SNI: retos y propuestas (505-512). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ediciones La Biblioteca S.A. de C.V., Distrito Federal, México (2015).
- <sup>17</sup> <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=24&mun=032>
- <sup>18</sup> Meza-Lozano B, Ortiz-Pérez MD, Ponce-Palomares, M, Castillo-Gutiérrez SG, Flores-Ramírez R, Cubillas-Tejeda AC. Implementación y evaluación de un programa de comunicación de riesgos por exposición a flúor en la comunidad de El Fuerte, Santa María del Río, San Luis Potosí, México *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (1) 87-100 (2016).
- <sup>19</sup> Ortiz Pérez MD, Portales Pérez DP, Cubillas AC, Ponce Palomares M. Educación en salud infantil. Programa de prevención para disminuir la exposición infantil a fluoruro y arsénico por el agua de consumo. Facultad de Medicina. UASLP (2009).
- <sup>20</sup> Castillo Gutiérrez Sonia. Biomarcadores de exposición a fluoruro y arsénico: su utilidad para evaluar un programa de prevención. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias Ambientales, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2010.
- <sup>21</sup> <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=24&mun=049>

## CASO DEL ESTADO DE GUANAJUATO

Mariana Cárdenas González, Dylan Terrell, Casilda  
Barajas Rocha e Iván Morales Arredondo

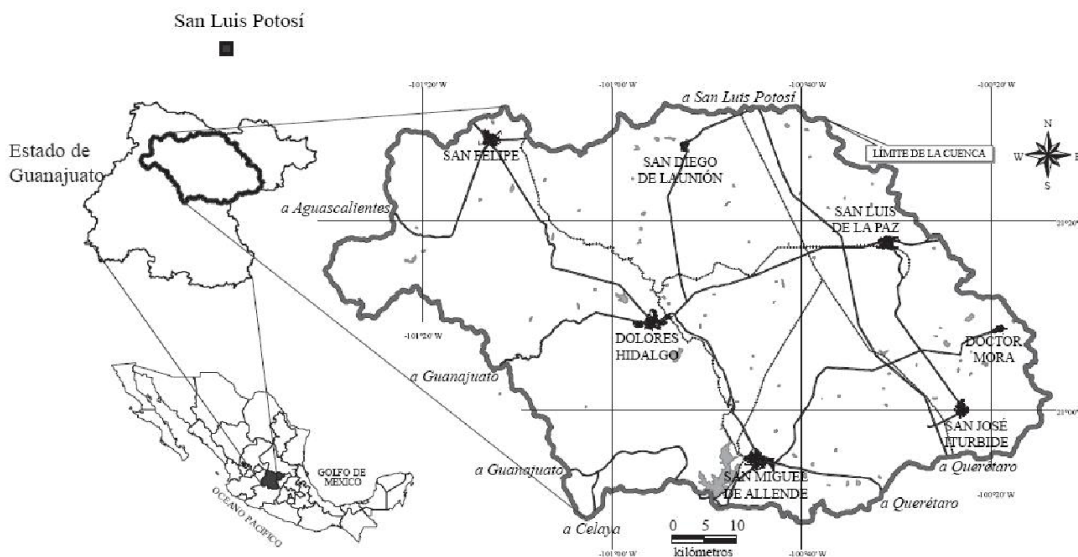
### Introducción y antecedentes

El desarrollo económico y cultural de Guanajuato está íntimamente ligado al agua, a su presencia y ausencia. La región hidrológica predominante en el estado (82%) es la región RH12 Lerma-Santiago-Pacífico, una de las más importantes del país. La agricultura es un sector económico estratégico en Guanajuato, 14% de la superficie del estado está destinada al cultivo de riego, que consume un 85% del total del agua superficial y subterránea. Guanajuato es la segunda entidad federativa con mayor sobreexplotación de acuíferos, con un índice de extracción y recarga de 1.91. En los municipios como Santiago Maravatío, Xichú, Cuerámaro y Victoria los niveles de extracción son superiores a 400m<sup>3</sup>. Según el Banco Mundial, aunque la precipitación media anual de Guanajuato es similar al promedio nacional, la disponibilidad anual per cápita es de apenas 1/5 a la del promedio en el país (~1000m<sup>3</sup>). Se calcula que el agotamiento generalizado del agua subterránea es en promedio de 2, 5 y hasta 7 metros por año. Antes de la intensificación y automatización de la perforación de pozo (antes de 1990) se podía encontrar el agua subterránea a una profundidad de 60 m bajo el nivel del suelo (nivel freático). Actualmente, en la región norte del estado, el acuífero freático llega a ser de 100 y 200 metros<sup>2</sup>.

### El caso de las SubCuenclas Alta del Río Laja y Laguna Seca

En la región norte-centro de Guanajuato se localizan las Subcuenclas Alta del Río Laja y Laguna Seca, también conocidas como “Cuenca de la Independencia”, la cual es un claro ejemplo del deterioro progresivo de uno de los acuíferos más importantes del estado de Guanajuato (Figura 5.9). El acuífero tiene un área de 6,840 km<sup>2</sup>, que se extiende a través de siete municipios: San Felipe, San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo, Doctor Mora, San José Iturbide y San Miguel de Allende. Ya desde los años 90 se extraía en promedio 400 hectómetros cúbicos (hm<sup>3</sup>) de agua subterránea con una recarga promedio de tan sólo 135 hm<sup>3</sup>. Las cifras actuales podrían ser alarmantes, tomando en cuenta que de 1992 al 2002 el área de riego en esta región aumentó 50%, de 22,000 a 40,000 hectáreas<sup>3</sup>.

Entre los años 1998 y 2002, los tres Consejos para el Desarrollo Regional y el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla, acordaron realizar estudios integrales del agua subterránea en la región. Los resultados de estas investigaciones revelaron que el agua que actualmente se extrae del acuífero tiene una edad de entre 10,000 y 35,000 años, sugiriendo que el agua subterránea de la región no es un recurso renovable a “escala humana”<sup>2</sup>. Además, en el análisis de la calidad del agua de 246 pozos, se encontraron concentraciones altas de arsénico (0.025-0.12 mg/L) y fluoruro (1.5-16 mg/L), especialmente en la porción noreste de la cuenca<sup>2</sup>, en un área aproximada de 500 km<sup>2</sup>. Las zonas más afectadas por concentraciones altas de fluoruro se ubican en las proximidades de San José Iturbide, otra en las cercanías de San Miguel de Allende y la última entre Dolores Hidalgo y San Felipe, mientras que, en San Luis de la Paz y San Diego de la Unión, se localizan las zonas más afectadas por altas concentraciones de arsénico. Sin embargo, es importante destacar que una gran proporción de las zonas afectadas presentaron niveles superiores a los permitidos por la NOM-127 para ambos, fluoruro y arsénico (1.5 y 0.025 mg/L, respectivamente).



**Figura 5.9.** Mapa de México indicando la localización del Estado de Guanajuato y la Cuenca de la Independencia. Mapa tomado del artículo del Dr Ortega-Guerrero<sup>2</sup>

El origen del fluoruro y del arsénico en esta zona, se asocia con reacciones de disolución de varias rocas volcánicas ubicadas en el acuífero fracturado y al mayor tiempo de residencia en el acuífero, entre otros factores<sup>2</sup>. Finalmente, como parte de las mismas investigaciones se encontró que más del 50% de las concesiones autorizadas de los volúmenes de extracción de agua subterránea, excedían la disponibilidad segura de agua en el acuífero<sup>4</sup>.

En marzo del 2006, un estudio exhaustivo sobre la calidad del agua en pozos de la zona urbana y rural del Municipio de San Miguel de Allende elaborado por la organización Ecosystems Sciences Foundation<sup>5</sup> y avalado por la Dirección del Medio Ambiente y Ecología y el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de San Miguel Allende (SAPASMA), encontraron altos niveles de contaminación por fluoruro en este municipio.

Actualmente, organizaciones de la sociedad civil como Caminos de Agua, en colaboración con las universidades de Texas A&M, Universidad de Guanajuato, Northern Illinois y Kansas State, siguen documentando niveles críticos de fluoruro y arsénico en San Miguel de Allende, San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo, San Felipe y San José Iturbide corroborando lo encontrado por la UNAM años atrás. A partir del análisis de la calidad de agua de 58 pozos, se ha documentado concentraciones de fluoruro de hasta 17 mg/L, y de hasta 0.13 mg/L de arsénico<sup>6,7</sup>.

También se han cuantificado concentraciones altas de ambos elementos en otras zonas del estado, como la zona del Bajío, en los municipios de Juventino Rosas y Villagrán. En pozos urbanos y agrícolas de estos municipios las concentraciones de fluoruro y arsénico llegan a ser de hasta 7 y 0.07 mg/L, respectivamente. Además, aunque la mayoría de la población reportó beber agua con algún tipo de tratamiento previo, la mitad de los residentes de ambos municipios aún utiliza agua entubada para cocinar y preparar alimentos<sup>8</sup>.

### Evidencias de los efectos en salud por la exposición a arsénico y fluoruro

En Guanajuato existen pocos estudios enfocados a evaluar la exposición y los efectos en salud de fluoruro y arsénico. En el Capítulo 3, del presente libro se documentaron los efectos en salud por la ingestión crónica de fluoruro que van desde los más evidentes como fluorosis dental (Imagen 5.8), hasta efectos irreversibles en el funcionamiento de varios órganos y sistemas. En un estudio

reciente realizado en 307 adolescentes residentes de comunidades rurales del noroeste del estado se encontraron niveles altos de exposición. El rango de concentración de fluoruro en la orina de los participantes fue de 0.5 a 6.6 mg/L, se considera que concentraciones urinarias mayores a 1.5 mg/L representan riesgo a la salud. Además, la prevalencia de fluorosis dental fue del 90% y se asoció tanto a las concentraciones de fluoruro en orina como al nivel de desnutrición de los participantes<sup>9</sup>. En el año 2018 el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) realizó un estudio piloto en las comunidades La Onza, Las Negritas, Vergel de Guadalupe, Puerto de Matancillas, Santa Rosa, Jaralillo, Encina y Las Palomas del municipio de San Luis de la Paz con la finalidad de evaluar los niveles de exposición a fluoruro y sus potenciales efectos en salud. Estas comunidades están abastecidas por el pozo *La Onza* que tiene concentraciones promedio de 4 mgF/L. En los primeros resultados del estudio, se encontró que la prevalencia de fluorosis dental en niños de entre 6 y 14 años es del 82%<sup>10</sup>.



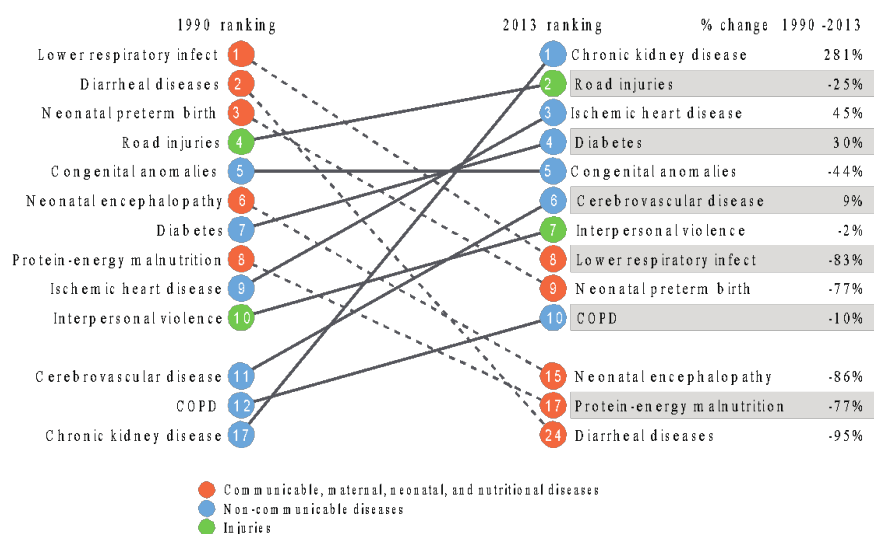
**Imagen 5.8.** Ejemplo de un caso de fluorosis dental en una mujer adulta de San Miguel de Allende, Guanajuato. Foto por Ernesto Álvarez, revista *Vice* ([versión electrónica](#)), Abril 2017.

Con respecto a las concentraciones de arsénico y sus posibles efectos en la salud, hasta la fecha no existe una evaluación definitiva en el estado de Guanajuato. Sin embargo, tomando en cuenta las altas concentraciones reportadas en ciertas zonas, especialmente en la parte norte del estado, y sabiendo que en las comunidades rurales el agua subterránea, sin ningún tipo de tratamiento, sigue siendo la fuente principal de abastecimiento para consumo humano, se asume que existe un riesgo inminente a la exposición a altas concentraciones de arsénico y, por ende, a sus efectos en salud.

A principios del 2000, en el municipio de Dolores Hidalgo se comenzó a notar un incremento poco usual en la tasa de enfermos renales. Le siguieron reportes informales de comunidades en San Diego de la Unión y San Luis de la Paz. Según el Instituto de Medición y Evaluación de la Salud de la Universidad de Washington (IHME, por sus siglas en inglés), en Guanajuato la enfermedad renal crónica (ERC) pasó de ser la decimoséptima causa de muerte prematura en 1990, a ser la primera causa en el año 2013, representando un incremento de casi un 300% en sólo 20 años (Figura 5.10)<sup>11</sup>. Sin embargo, no existen datos oficiales por parte de sector salud que reporten una incidencia por arriba del promedio nacional en esta región del país. Lo anterior se debe principalmente al sub-registro que existe de la enfermedad y que no es exclusivo del estado o del país. La ERC es una enfermedad silenciosa que es difícil de diagnosticar y cuyo seguimiento, por sus altos costos, es difícil de cumplir y mantener. En un esfuerzo por impulsar el diagnóstico temprano de la ERC, la Fundación del Riñón en Estados Unidos creó el programa para la evaluación temprana de daño renal KEEP (por sus siglas en inglés). KEEP se ha reproducido en otros países como México, implementado por la Fundación Mexicana del Riñón y apoyado por varias instituciones públicas de salud. Esta estrategia de prevención consiste en identificar poblaciones en alto riesgo al desarrollo de ERC en las etapas tempranas de la enfermedad. El

programa toma como factores de riesgo a sujetos con hipertensión, diabetes o algún antecedente familiar de enfermedad renal. Por ejemplo, se ha reportado que la prevalencia de la enfermedad renal crónica en la ciudad de México es de 22%<sup>12</sup>. En marzo del 2015, la Fundación Mexicana del Riñón, respondiendo a peticiones de varias asociaciones civiles en Dolores Hidalgo encargadas de apoyar a pacientes con ERC, realizó un estudio piloto para determinar la incidencia de la enfermedad en niños y adultos. Se encontró que la prevalencia es de 14 y 37% en niños y adultos, respectivamente. Es de subrayar que la prevalencia en niños es preocupante, de los que desarrollen la ERC estarán en la etapa mas avanzada de la enfermedad para los 20 años (la sobrevivida en esta etapa, con un tratamiento adecuado, es menor a 10 años<sup>13</sup>). Recientemente, con base en los registros del Centro Estatal de Trasplantes (CETRA) de Guanajuato entre 2013 y 2015, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, reportó que la mayoría de los casos de ERC que se presentan en Guanajuato son en jóvenes menores de 30 años (67%), que en su mayoría utilizan agua de la llave para consumo (84%). Las mayores tasas de incidencia de la enfermedad se concentran en la región norte del estado. Los municipios de San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo, San Luis de la Paz, San Felipe y San Miguel de Allende fueron identificados como áreas con exceso de casos de ERC y como prioritarias para la prevención de la ERC en el estado<sup>14</sup>. Aunque la localización de la mayoría de los pacientes renales en el estado coincide con la de las Subcuencas Alta del Río Laja y Laguna Seca (Cuenca de Independencia), a la fecha no se ha llevado a cabo un estudio lo suficientemente robusto para dar evidencia de la existencia o no de la relación de esta enfermedad con factores ambientales como el consumo de agua contaminada con fluoruro y/o arsénico.

Principales Causas de Muerte Prematura (YYLs\*), 1990 y 2013 y porcentaje de cambio, 1990-2013 en el Estado de Guanajuato



\*YYLs (years of life lost due to premature mortality), años de vida perdidos debido a muerte prematura.

**Figura 5.10.** Listado de las principales causas de muerte prematura en el Estado de Guanajuato en los años 1990 y 2013. El listado es con base en el indicador de años de vida perdidos debido a muerte prematura (YYLs, por sus siglas en inglés) por cada 100,00 habitantes, todas las edades y ambos sexos. Figura modificada del original en IHME 2013<sup>30</sup>.

#### *Acciones por parte de la sociedad civil y organizaciones sociales en la región noreste del estado de Guanajuato*

Los primeros pasos para conocer y divulgar la situación en cuanto al problema de contaminación del agua con arsénico y fluoruro en la región noreste del estado de Guanajuato iniciaron en el año 2000. La sociedad civil, la academia y el gobierno formaron seis “Consejos para el Desarrollo Regional”,

promovidos e impulsados por la Secretaría de Desarrollo Social del Norte y Noreste del Estado y Humano del Gobierno del Estado de Guanajuato. Durante el trabajo de estos consejos se aprobó el apoyo a estudios técnicos encaminados a evaluar las condiciones del agua subterránea de la región. Se comisionó al Centro de Geociencias de la UNAM, para realizar estos estudios. Los resultados<sup>2</sup>, mencionados previamente, fueron la primera evidencia de la problemática con respecto a la calidad del agua y al deterioro del acuífero. A partir de estos primeros estudios los Consejos para el Desarrollo Regional del Norte y Noreste del estado y la UNAM promovieron la realización de un documental<sup>15</sup>, un atlas actualizado de la cuenca, material didáctico con la información generada en los estudios y varios diplomados educativos dirigidos principalmente a la población en general y representantes gubernamentales.

A partir de los estudios y acciones lideradas por Centro de Geociencias de la UNAM, se llevaron a cabo otras evaluaciones, sobre todo en la zona norte del estado. Se identificaron comunidades prioritarias que guiaron la intervención mediante alternativas de bajo costo. De aquí que se instalaron los primeros sistemas de captación de agua de lluvia -en colaboración con el Instituto Internacional de Recursos Renovables, A.C. (IRRI)- como una alternativa segura, práctica y eficiente. En Dolores Hidalgo, el Centro de Desarrollo Agropecuario, A.C. (CEDESA) implementó el modelo de construcción de cisternas para captación de agua de lluvia, y en colaboración con el Club Rotarios de San Miguel de Allende se han construido más de mil en toda la región de la Subcuenca Alta del Río Laja/Cuenca de la Independencia. Este modelo involucra a la comunidad en la construcción y mantenimiento de las cisternas, y hasta ahora ha sido adoptado por numerosas organizaciones y coaliciones de la región involucradas en la lucha por el derecho humano al agua en cantidad y calidad (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1.** Organizaciones civiles involucradas en la lucha por el derecho humano al agua y a la salud en la Subcuenca Alta del Río Laja y Laguna Seca, Guanajuato.

| ORGANIZACIÓN<br>Página Web / Contacto  | AÑO DE FUND. | MUNICIPIO             | MISIÓN-ACCIÓN  |
|--|--------------|-----------------------|--|
| Club Rotario de San Miguel de Allende del Medio Día<br><a href="https://www.rotarysammidday.org/">https://www.rotarysammidday.org/</a>                   | 1950         | San Miguel de Allende | Brindar asistencia a otros para mejorar la calidad de vida y promover el entendimiento, la buena voluntad y la paz de la comunidad.  |
| Centro de Desarrollo Agropecuario (CEDESA, A.C.)<br>Facebook: Cedesa, A.C.   | 1970         | Dolores Hidalgo       | Afirmación de identidad de las comunidades, defender la tierra, asesorar causas sociales destinadas a mejorar la vida comunitaria, llevar información para el cuidado de la salud en las comunidades y seguir capacitando a las mismas para el cultivo de hierbas medicinales, la apicultura, etc. |
| Servicios Comunitarios de Pozo Ademado (SECOPA)<br>carmen_16cm@hotmail.com   | 1989         | San Diego de la Unión | Contribuir para un desarrollo integral comunitario en la región a través de la promoción de la salud y el cuidado del agua en la región.   |
| Fundación de Apoyo Infantil Guanajuato, A.C.<br><a href="http://www.fauguanajuato.org/">http://www.fauguanajuato.org/</a><br>direccion@faiguanajuato.org | 1992         | San Miguel de Allende | Facilitar procesos de aprendizaje, usando metodologías participativas para el ejercicio de los derechos de la niñez y del medio ambiente. Cuentan con el centro demostrativo para el manejo del agua: Centro Regional de Capacitación del Agua Las Yervas (CERECALY).                              |
| Salvemos el Río Laja, A.C.<br>amabulnes@hotmail.com<br>info@rio-laja.org<br>Facebook: Salvemos Río Laja  | 2000         | San Miguel de Allende | La restauración y conservación de los ecosistemas naturales de la Subcuenca Alta del Río Laja con la participación de los habitantes de las comunidades rurales  |

|   |      |  |   |
|---|------|--|---|
| Instituto Internacional de Recursos Renovables A.C. (IRRI)<br><a href="https://www.irrimexico.org/">https://www.irrimexico.org/</a> | 2005 | San Miguel de Allende                          | En IIRI México emprendemos procesos de desarrollo sostenible a partir de programas y proyectos que involucren de forma integral los pilares económico, social, ambiental y cultural.  |
| El Maíz Más Pequeño A.C.<br>elmaizmaspequeno@gmail.com  | 2009 | San Miguel de Allende y Sierra Gorda Queretana | Contribuir al mejoramiento de la sociedad a través de fortalecer procesos de formación en: la soberanía alimentaria, educación, salud, cultura y desarrollo comunitario.  |
| Yaax Wool, A.C.<br><a href="https://yaaxwool.wordpress.com/">https://yaaxwool.wordpress.com/</a>                                    | 2009 | San Miguel de Allende e Irapuato               | Promover el desarrollo social y humano, en comunidades rurales, indígenas y colonias urbano-marginadas, cuyos habitantes viven condiciones de pobreza extrema y marginalidad, propiciando el respeto de los derechos humanos y el cuidado del medio ambiente.   |
| Comunidades Unidas por la Vida y el Agua Pastoral Social (CUVA-PAS)<br>ale.govi11@outlook.es  | 2010 | San Luis de la Paz                             | Búsqueda de soluciones a partir de la fe, de la organización y del trabajo en red y en la comunidad en respuesta a la situación que amenaza a nuestra salud y territorio en la realidad de nuestro acuífero gravemente contaminado.   |
| Caminos de Agua A.C.<br><a href="https://caminosdeagua.org/">https://caminosdeagua.org/</a>   | 2012 | San Miguel de Allende                          | Proporcionar soluciones de fuente abierta ("open source") para las comunidades en riesgo de nuestra cuenca en Guanajuato, México, y aprovechar esas soluciones para otros que enfrentan desafíos similares relacionados con el agua en todo el mundo. Desarrollan un mapa interactivo de monitoreo de la calidad del agua en la región. |
| Observatorio Ciudadano del agua (OCAS)<br><a href="http://aguavidasma.org/about/">http://aguavidasma.org/about/</a>                 | 2012 | San Miguel de Allende                          | Una comunidad de residentes comprometidos con la observación y el estudio de la gestión del agua en San Miguel de Allende. Su trabajo consiste en informar a la población y a las autoridades responsables sobre las problemáticas actuales en el manejo de este recurso en su origen, uso y tratamiento.                               |
| labradoresesperanza@gmail.com<br><a href="http://verde-esperanza.com.mx/">http://verde-esperanza.com.mx/</a>                        | 2013 | San Luis de la Paz                             | Promover la vida digna en las comunidades rurales de la región. Algunas áreas de acción son: pastoral campesina, agroecología, derecho humano al agua. Creación de cooperativa de productos locales.  |

En septiembre de 2013, gracias a la gestión de la Coalición en Defensa de la Cuenca de la Independencia (CODECIN) -articulada con la Asamblea Nacional de Afectados Ambientales (ANAA), el Tribunal Permanente de los Pueblos, un tribunal ético internacional, declaró: "Dada la gravedad de los casos denunciados por sobreexplotación y contaminación del agua y su impacto sobre la población y los ecosistemas, se recomienda que el Estado Mexicano, a través de su institución responsable en materia de salud y medio ambiente, declare zonas de emergencia por riesgo ambiental y sanitario a la Cuenca de la Independencia, en el estado de Guanajuato"<sup>16</sup>.

## Referencias

- <sup>1</sup> Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales. Consulta temática: Volúmenes de extracción y recarga de acuíferos sobreexplotados con base en Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas. Septiembre, 2014 y Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Planeación, Febrero, 2017.
- <sup>2</sup> Ortega-Guerrero MA. Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (1), 143-161 (2009).
- <sup>3</sup> Comisión Nacional del Agua. Bases de datos estadísticos e hidrométricos de los distritos de riego. Gerencia de Distrito y Unidades de riego (2004).
- <sup>4</sup> Ortega Guerrero MA. Situación del agua subterránea en dos regiones del estado de Guanajuato, ubicadas dentro de la Cuenca Lerma-Chapala: Implicaciones sociales, legislativas, políticas y económicas. *Desarrollo, recursos naturales y actores sociales en Guanajuato*. Ed. Héctor Ruiz R., Everardo Rodríguez G., Jorge A. Rodríguez H.; Universidad de Guanajuato, Unidad de Estudios Superiores de Salvatierra y el Grupo interdisciplinario de Reflexión y Asesoría para el Desarrollo, A.C. (CIRAD A.C.). p. 111-132. (2008).
- <sup>5</sup> Ecosystem Sciences Foundation (ESF) (2006). Calidad del Agua de los Pozos en San Miguel de Allende. Fase I: Resultados y Conclusiones. Disponible en: [http://www.ecosystemsciences.com/Portals/0/pdfs/Drinking%20Water%20Quality%20in%20San%20Miguel,%20Mexico%20\(En%20Español\).pdf](http://www.ecosystemsciences.com/Portals/0/pdfs/Drinking%20Water%20Quality%20in%20San%20Miguel,%20Mexico%20(En%20Español).pdf)
- <sup>6</sup> Center for Appropriate Technology and Indigenous Sustainability-Mexico (CATIS-Mexico), Reporte de la Calidad del Agua en Pozos Comunitarios en el Norte de Guanajuato, 19 de agosto, 2013.
- <sup>7</sup> Mapa de Monitoreo de Agua de la región noreste de Guanajuato elaborado por Caminos de Agua. <https://caminosdeagua.org/es/mapa-de-monitoreo-de-agua/>
- <sup>8</sup> Morales Arredondo JI, Armienta María A, Barrera Arrazola P, Flores Ocampo I. (Reporte de los Municipios de Juventino Rosas y Villagrán, Guanajuato facilitado por el Doctor José Ivan Morales Arredondo (2018). [Liga](#)
- <sup>9</sup> Aguilar Diaz FC, De la Fuente Hernández J, Cintra Viveiro CA. Dental fluorosis, fluoride in urine, and nutritional status in adolescent students living in the rural areas of Guanajuato, Mexico. *J Int Soc Prev Community Dent*. 6(6): 517–522 (2016).
- <sup>10</sup> Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). Informe de la evaluación de riesgos por exposición a flúor en agua para consumo humano en San Luis de la Paz, Guanajuato. Parte del programa de Evaluación de Riesgos Avanzada del Doctorado en Ciencias (2018).
- <sup>11</sup> Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) Global Burden of Disease Study 1990-2013, Mexico. Leading Causes of YLLs to Premature Death, 1990 and 2013, and Percent Change, 1990-2013. Disponible en: <http://www.healthdata.org/mexico>. (2013).
- <sup>12</sup> Obrador GT, García-García G, Villa AR, Rubilar X, Olvera N, Ferreira E, Virgen M, Gutiérrez-Padilla JA, Plascencia-Alonso M, Mendoza-García M, Plascencia-Pérez S Prevalence of chronic kidney disease in the Kidney Early Evaluation Program (KEEP) México and comparison with KEEP US. *Kidney Int Suppl.*(116):S2-8. (2010).
- <sup>13</sup> Fundación Mexicana del Riñón. Proyecto Piloto de Prevención y Detección Temprana de la Enfermedad Renal Crónica con Alto Riesgo “KEEP” (2014 y 2015).
- <sup>14</sup> Murillo Valdez D. “Metodología para identificar áreas prioritarias para la inversión en investigación de la Enfermedad Renal Crónica”. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias Ambientales. Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (2016).
- <sup>15</sup> UNAM, y Consejos para el Desarrollo Social del Norte y Noreste del Estado, Gobierno del Estado de Guanajuato. Documental La Cuenca de Independencia. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=O-DvctcQuqk> (2004).
- <sup>16</sup> Demanda ante el Tribunal Permanente de los Pueblos en el caso de la Coalición en Defensa de la Cuenca de la Independencia (CODECIN) v. los Estados Unidos Mexicanos. <https://caminosdeagua.org/es/documentos> (2013).

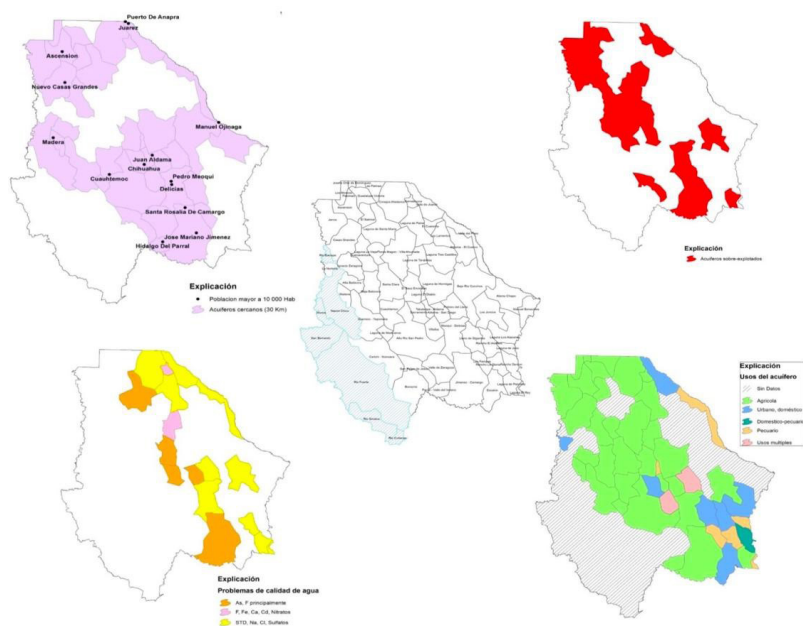
## CASO DEL ESTADO DE CHIHUAHUA

María de Lourdes Ballinas-Casarrubias, Juan Antúnez, María del Carmen González-Horta, Blanca Sánchez-Ramírez y Luz María Del Razo

El Estado de Chihuahua, cubre una superficie de 247,455 km<sup>2</sup>, con un volumen de agua renovable de 12 005 hm<sup>3</sup>/año, 3.75 millones de habitantes en el 2016, y una aportación del 3.03% al PIB nacional<sup>1</sup>. El Estado abarca gran parte del desierto localizado en la zona norte de la República Mexicana y posee un clima seco en el 40% de su territorio el cual se ve agravado por una baja precipitación anual (menor a 400 mm). Su potencial hídrico está conformado por aguas superficiales (ríos, lagunas y presas) y pozos de aguas subterráneas; mismo que se ha visto disminuido debido a diversos factores tales como la sequía, la sobreexplotación de los recursos, el mal uso y la contaminación. El agua superficial en el Estado de Chihuahua tiene volumen reportado de 10,619,536 m<sup>3</sup>/año. El territorio del estado es abastecido por cuatro regiones hidrográficas de las cuales la cuenca “Bravo-Conchos” cobija el 31.46% del territorio estatal. Esta Cuenca abastece al 57% de los distritos de riego. En la parte media de la cuenca, hay dos presas importantes: La Francisco Madero y La Boquilla, las cuales abastecen de agua para el riego agrícola. Debido a las condiciones del Estado de Chihuahua, en periodos de estiaje, es común utilizar agua de origen subterráneo, en porcentajes muy elevados (> 80%).

En Chihuahua existen 65 acuíferos de los cuales 15 se encuentran sobre explotados y 2 en proceso de salinización, las cuales se enlistan a continuación<sup>1</sup>: Ascensión, Baja Babícora, Buenaventura, Cuauhtémoc, Casas Grandes, El Sauz – Encinillas, Janos, Samalayuca, Palomas - Guadalupe Victoria, Flores Magón - Villa Ahumada, Santa Clara, Los Moscos, Sacramento, Meoqui-Delicias, Jiménez-Camargo, Valle de Juárez, San Felipe de Jesús, Los Juncos y Laguna de Palomas Chihuahua.

La calidad de agua de estas fuentes en el siglo pasado era óptima para su consumo humano directo, sin embargo, el fenómeno de sobre extracción ha causado que aumente la profundidad de los pozos y por ende se tiene una mayor concentración de sales y otros compuestos, debida a procesos de lixiviación natural. De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA), los acuíferos de Chihuahua-Sacramento y Tabalaopa-Aldama son los que tienen una mayor extracción para uso municipal e industrial. Se tiene una planificación en la reducción del uso de estos acuíferos para conservarlos y recargarlos. Otra de las problemáticas adicionales al abasto es la contaminación del agua de estos pozos, donde se tienen reportes de concentraciones altas de contaminantes en toda la región; principalmente arsénico y fluoruro. Se puede apreciar en la Figura 5.11 la distribución de los acuíferos en función de su demanda, uso, calidad del agua y situación geográfica, encontrando algunos de ellos un estado crítico, por su alta explotación, uso y parámetros de calidad del agua inadecuados (p. e. acuífero Sauz-Encinillas). En México, la Norma modificada NOM 127-SSA-1994 (2000) estipula una concentración máxima de 0.025 mg As/L en agua potable. En el estado de Chihuahua, se han detectado varias regiones donde el agua de pozos y norias de consumo humano, supera esos niveles, los cuales han sido reportados desde inicios de la década de los noventa. En 1996, los organismos operadores, donde cabe destacar el inicio de operación del Departamento de Calidad del Agua de la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS), así como estudios efectuados por la CNA por la Dra. Sylvia Vega Gleason (2001), reportaron concentraciones altas de arsénico y fluoruro en los acuíferos de Delicias-Meoqui<sup>2</sup>. La principal acción realizada por la JCAS fue la de sellar pozos profundos; es decir, aquellos con una profundidad mayor a los 50m; sin embargo, esta no fue suficiente y se comenzó entonces, con un estudio más a detalle de la distribución y ocurrencia de los contaminantes en aguas subterráneas.



**Figura 5.11.** Acuíferos en el Estado de Chihuahua México, en función de población, sobre explotación, usos y calidad del agua. Contribución de la M. I. Cecilia Zesati.

Los primeros estudios formales para evaluar la calidad del agua se centraron en dos zonas, la llamada zona norte que abarcaba el acuífero de Delicias-Meoqui y la zona sur, que abarcó el acuífero de Jiménez Camargo. En ellos se definió una falla de arsénico en una franja de 200 km, que comprendió toda la zona de estudio. En el año 2001 la Dra. Vega y colaboradores<sup>2</sup>, reportaron concentraciones entre 0.05 y 0.5 mg de arsénico/L en el acuífero de Delicias-Meoqui y de fluoruro, hasta de 8.8 mg/L. En la región de Jiménez–Camargo, la concentración de arsénico fluctuó entre 0.05 y 0.5 mg/L, mientras que las concentraciones de fluoruro llegaron a 7.7 mg/L. Las concentraciones más altas para arsénico se reportaron en Aldama, Julimes y Delicias, con concentraciones hasta los 0.45 mg/L.

Este estudio permitió al gobierno de Chihuahua y a la JCAS en 1999, gestionar recursos suficientes para efectuar la primera prueba de planta piloto basada en procesos de membrana con fines de producción de agua pura a partir de la proveniente de pozos. Esta fue realizada en la población de Leyes de Reforma en la Ciudad de Camargo, teniendo una reducción de más del 90% de la concentración de arsénico, en procesos en los que se obtuvieron hasta 10,000 litros por día de agua purificada. El buen resultado obtenido permitió comenzar con la puesta a punto en los años subsecuentes, de 30 plantas de ósmosis inversa más con capacidades similares en los municipios de Julimes y Rosales.

Sin embargo, el consumo de agua aunado a fuertes sequías en la década de los noventas, agravaron el problema de calidad de agua de los acuíferos mencionados. Estudios más recientes, como el efectuado en el 2009 por la Dra. Socorro Espino-Valdés<sup>3</sup>, investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), reportaron niveles superiores de arsénico en 72% de los 61 pozos muestreados en el acuífero de Meoqui-Delicias. En el 2013, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) realizaron un estudio sobre el origen de la presencia de arsénico y fluoruro en este acuífero. Reportaron que está constituido por depósitos aluviales y lacustres del periodo cuaternario, que subyacen a una secuencia cretácica de calizas y areniscas calcáreas, junto con horizontes de yesos, lutitas y calizas arcillosas; origen de importantes yacimientos minerales. En este estudio realizaron el análisis de 139 pozos del área, encontrando concentraciones de arsénico total en el

rango de 0.002-0.225 mg/L asociados a ambientes aluviales con aguas subterráneas de bajas temperaturas ( $T < 30^{\circ}\text{C}$ )<sup>4</sup>.

En relación a otros reportes en el Estado caben destacar los estudios efectuados por la CONAGUA y el Organismo Operador de Ciudad Juárez<sup>4</sup>, quienes realizaron un proyecto en el área de la Mesilla informando concentraciones de arsénico en el agua subterránea de 0.005-0.044 mg/L y para muestras obtenidas a 250 m de profundidad de 0.005–0.650 mg/L (CONAGUA & JMAS-Juárez, 2000).

Varios estudios han corroborado la problemática de la exposición en el estado. El grupo del Instituto Nacional de Ecología (INECOL), encabezado por el Dr. Víctor Reyes Gómez ha estudiado la ocurrencia y origen del arsénico y el fluoruro en diversos acuíferos<sup>5</sup>. En el de Tabaloapa-Aldama-Laguna de Hormigas la elevada temperatura y la presencia de riolita principalmente, ha promovido la exposición simultánea de arsénico y fluoruro. En el trabajo reportado por Reyes en el 2013<sup>5</sup>, se encontraron concentraciones elevadas tanto de arsénico como de fluoruro en 34 muestras de pozos. En siete de estos pozos la concentración de arsénico, rebasó los 0.025 mg/L mientras que en 13 se sobrepasó la concentración de 1.5 mg de fluoruro/L en sitios cercanos a la Ciudad de Aldama.

A mediados de los noventa (1994-1996), se reportaron los primeros casos crónicos de hiperpigmentación debidos al consumo de agua contaminada por arsénico en los habitantes de la comunidad La Casita (a 60 km de la ciudad de Chihuahua). La causa de los daños severos de intoxicación se debió a la ingesta de aguas altamente contaminadas con arsénico, provenientes del pozo principal de consumo de la comunidad<sup>6</sup>.

El gobierno del Estado de Chihuahua, para atender la problemática, sugirió abrir un nuevo pozo a 2 km del principal, el cual se encontró libre de la presencia de arsénico. Estudios más recientes realizados por la JCAS y reportados por el grupo de Ingenieros encabezado por el Dr. Ignacio Reyes Cortés<sup>7</sup>, han sugerido que el caso de contaminación de arsénico en el pozo que abastecía a La Casita se debía a la percolación del agua meteórica a través de las rocas volcánicas de naturaleza andesítico-basáltica.

En un plan integral de atención a la Salud de los habitantes de La Casita, el gobierno municipal en el año de 2002, convino en conjunto con el Colegio de Médicos Cirujanos y Homeópatas del Estado de Chihuahua y la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la UACH, en efectuar el diagnóstico y tratamiento médico de estos habitantes.

Los resultados de dicho plan fueron tales que en 2004 se creó el Comité de Estudios de arsénico. Dentro de las actividades del comité estuvieron la implementación de un plan estatal de atención integral a la salud de pobladores expuestos a contaminantes diversos, a través del consumo de agua no purificada, implementando métodos de tratamiento tales como la ósmosis inversa.

Posteriormente durante 2008-2013 las actividades en torno a los estudios en salud se continuaron realizando, principalmente financiadas por el National Institute of Health (NIH), a través de la participación de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, encabezados por el Dr. Miroslav Styblo, así como el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), con el liderazgo de la Dra. Luz María Del Razo; el Dr. Gonzalo García Vargas de la Universidad Juárez del Estado de Durango y la FCQ- UACH, coordinados por la Dra. María del Carmen González Horta y el Colegio de Médicos Homeópatas del Estado de Chihuahua. En este proyecto se evaluaron alrededor de 5000 muestras de agua y se atendieron aproximadamente a 1,200 habitantes del Estado de Chihuahua, efectuando análisis clínicos enfocados en enfermedades metabólicas relacionadas con la presencia de arsénico en el agua de bebida.

Los resultados obtenidos han dado a lugar a ocho publicaciones arbitradas, y decenas de presentaciones de divulgación, así como proyectos de continuación para abordar la temática de exposición a arsénico y fluoruro a través del agua de consumo.

Dentro de las contribuciones más significativas se encuentran las reportadas en el 2014-15, donde destacan los que a continuación se describen. Los resultados de 1,119 habitantes de 13 municipios<sup>8</sup>: Aldama, Camargo, Chihuahua, Coronado, Delicias, Jiménez, Julimes, la Cruz, Meoqui, Rosales, San Francisco de Conchos, Saucillo y Satevó, hallando concentraciones urinarias dentro de los siguientes rangos de 0.0051 a 0.467 mg/L de arsénico y de 0.1 a 14.4 mg/L de fluoruro. Cabe destacar, que en varias de las localidades evaluadas el gobierno ha instalado plantas de tratamiento de ósmosis inversa, no obstante, un porcentaje importante de la población sigue consumiendo agua sin tratar, por lo que se recomienda ampliar la difusión de la problemática de contaminación en el área. Otros estudios, con los participantes evaluados, demostraron que la exposición de arsénico está relacionada a enfermedades genéticas asociadas con cáncer y a enfermedades metabólicas como la diabetes tipo 2 y el riesgo cardiometabólico entre otros efectos los cuales son abordados en el capítulo 3.3 del presente libro. Con relación a la exposición a fluoruro, existen informes de casos de fluorosis dental. Recientemente, Jiménez Córdova y colaboradores reportaron también la presencia de fluorosis dental y la disminución de la función renal debida a la exposición a fluoruro en un estudio realizado en tres localidades<sup>9</sup>, el Sauz como grupo control, y Aldama y Guadalupe Victoria con concentraciones elevadas de fluoruro en agua (hasta 4.28 mg/L).

En relación a la presencia de arsénico en otros acuíferos, la Dra. Lucy del Mar Camacho y colaboradores en 2011; así como el de la Dra. María Teresa Alarcón y colaboradores en el 2013 realizaron un compendio de las concentraciones altas de ocurrencia de arsénico y fluoruro<sup>10,11</sup>. Ambas contribuciones comentan que las concentraciones de arsénico que se encuentran en el agua se asocian tanto a un origen natural como a procesos volcánicos, con contribuciones antropogénicas significativas en lugares cercanos a minas o fundidoras de minerales que contienen arsénico. Actualmente se tienen reportes recientes en los periódicos locales de presencia de arsénico en el acuífero de Jiménez, estudios realizados por estudiantes de la Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco<sup>12</sup>, reportando para 60 muestras, un 13% fuera de normativa para los niveles de arsénico.

En cuanto a la Ciudad de Chihuahua, Mahlkecht y colaboradores estudiaron la geoquímica del agua subterránea de la ciudad en la cuenca del Río Conchos y sus implicaciones en el uso del agua<sup>13</sup>. El agua mostró provenir de meteorización del feldespato, de la parte alta de la ciudad. Encontraron concentraciones en el agua de hasta 0.344 mg de arsénico/L y de 9.7 mg de fluoruro/L.

En relación a la acción de los organismos operadores y el gobierno del Estado cabe destacar que actualmente se tienen en operación 371 plantas de ósmosis inversa en el Estado, abarcando 50 municipios, de un total de 67. A pesar del gran esfuerzo que se ha realizado para la obtención de agua purificada mediante procesos de ósmosis inversa, existen grandes áreas de oportunidad para su optimización. La Dra. María Teresa Alarcón, investigadora del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en el 2014, documentó el impacto ambiental generado por el uso de ósmosis inversa en la remoción de arsénico para la obtención de agua potable en el estado<sup>14</sup>. Una de las prerrogativas es que las plantas de ósmosis inversa, concentran el contaminante en el agua de rechazo. Por tanto, la disposición de los residuos puede generar un problema ambiental en el suelo y agua superficial. En su trabajo en conjunto con el Dr. Mario Olmos, determinaron la concentración de arsénico en el agua de rechazo, y su disposición, en las plantas de ósmosis de diferentes comunidades. De estos, el 58% de las descargas son en los drenajes, y el 18% son utilizadas para riego agrícola. Esta última, concentra el metaloide en la superficie con velocidades de saturación al límite de hasta 23 días m<sup>2</sup>. Los investigadores, proponen la recuperación del agua de rechazo, mediante el uso de humedales construidos.

Los estudios realizados en aguas superficiales también son de suma importancia<sup>15,16</sup>. En cuanto al origen antropogénico de arsénico, cabe destacar su presencia por arriba de los niveles recomendados en el río San Pedro en Chihuahua. Este río es tributario del Río Conchos y se une al Río Bravo en Chihuahua. Por tanto se sugiere que la actividad en el río Conchos y sus descargas, son la principal causa de la presencia de arsénico. En el año 2005-2006 se evaluaron 165 muestras en donde las concentraciones fueron de 0.011 a 0.587 mgAs/L con los siguientes puntos de muestreo, La Presa, Rosales, Meoqui, Torreón y Junta de los ríos. Posteriormente, en 2008 Gutiérrez y colaboradores informaron que concentraciones de arsénico que se detectaron en el río Chuiscar fueron de 0.0192 mg/L y en el Río Conchos de 0.243 mg/L.

Actualmente, se realizan esfuerzos importantes para integrar el Foro de Consulta para el plan estatal hídrico 2040, con el fin de definir una política de largo alcance que permita el desarrollo social, económico y ambiental, mediante el aprovechamiento sustentable del agua en Chihuahua. Dentro de las principales acciones, el año precedente se realizaron varios foros de consulta, culminando con el Congreso de Calidad del agua, efectuado en las instalaciones de la DES-Ingeniería UACH. Participaron en este evento académico como organizadores, la FCQ, la Facultad de Ingeniería, la JCAS, Junta Municipal de Agua y Saneamiento, Secretaría de Salud, Secretaría de Desarrollo Rural, Presidencia Municipal de Chihuahua, CONAGUA, Colegio de Médicos Cirujanos y Homeópatas de Chihuahua, y la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza.

## Referencias

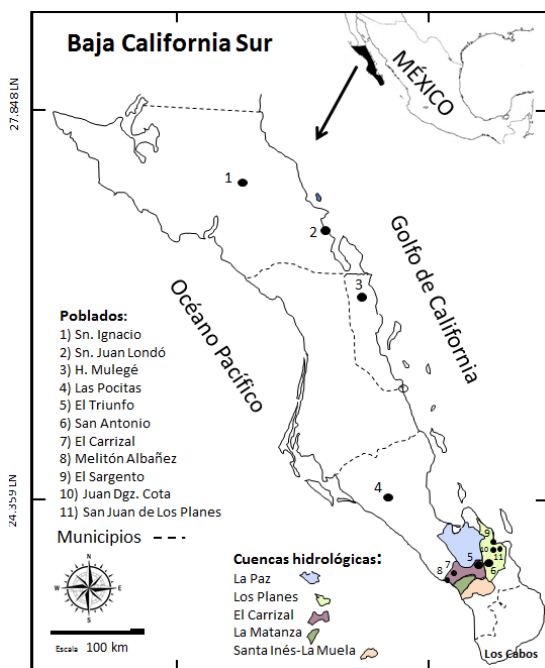
- <sup>1</sup> Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT, 291pp. México (2017).
- <sup>2</sup> Vega S. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. CNA (2001). <http://cepis.ops-oms.org>.
- <sup>3</sup> Espino-Valdés MS, Barrera-Prieto Y, Herrera-Peraza E. Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, Enero-Abril, Vol. III, 1, 8-18 (2009).
- <sup>4</sup> Arreguín-Cortés R, Chávez-Guillén PR, Soto-Navarro. SEMARNAT-CONAGUA. Una revisión de la presencia de As en el agua subterránea en México. (2013).
- <sup>5</sup> Reyes-Gómez VM, Alarcón-Herrera MT, Gutiérrez M, Núñez López D. Fluoride and Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico: Contaminant Levels, Potential Sources, and Co-occurrence. *Water Air Soil Pollut*, 224:1433 (2013).
- <sup>6</sup> Ochoa Reyes J, Vidal Lozano A, Lerma Santana A, Gómez Reza L, Reta Sánchez A, Fernández Escajeda D, Vidal Flores A., Trevizo Ortiz L, González Piñeyro DM, Ornelas Reynoso M, Fernández Luna F, Hernández García A, del Rosal Díaz C, Chavira Renova J, Orozco Domínguez LR. Arsenicismo subagudo y crónico en una población rural. *Dermatología Rev Mex*;53(2),63-69 (2009).
- <sup>7</sup> Reyes Cortés I, Reyes Cortés M, Villalba, Montero Cabrera ME, Ledesma Ruiz R, Barrera Prieto Y, Precoma Mojarro AY, Vázquez Balderas J. Geos, Origen del As en las cuencas endorreicas, Chihuahua, México, 26, 1 (2006).
- <sup>8</sup> González-Horta C, Ballinas-Casarrubias L, Sánchez-Ramírez B, Ishida MC, Barrera-Hernández A, Gutierrez-Torres D, Zacarías O, Saunders RJ, Drobna Z, Méndez MA, García-Vargas G, Loomis D, Styblo M, Del Razo LM. A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua, México. *Int. J. Env. Res. Public Health*, 12, 4587-4601 (2015).
- <sup>9</sup> Jimenez-Cordova MI, Cardenas-Gonzalez M, Aguilar-Madrid G, Sánchez-Peña, LC, Barrera-Hernández A, Dominguez-Guerrero IA, Gonzalez-Horta C, Barbier OC, Del Razo, LM. Evaluation of kidney injury biomarkers in an adult Mexican population environmentally exposed to fluoride and low arsenic levels. *Toxicol. and Applied Pharmacol*, 352, 97-106(2018).
- <sup>10</sup> Camacho L M, Gutiérrez M, Alarcón-Herrera MT, Villalba ML, Deng S. Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and Southwestern USA. *Chemosphere*, 83, 211-225 (2011).
- <sup>11</sup> Alarcon-Herrera MT, Bundschuh J, Bibhash N, Nicolli H, Gutierrez M, Reyes-Gomez V, Nuñez D, Martín I, Sracek O. Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of Latin America: Genesis, mobility and remediation. *J of Haz Mat*, 262, 960-969 (2013).
- <sup>12</sup> (<https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/local/contaminacion-por-arsenico-en-pozos-de-jimenez-486879.html>) consultado el 13 julio 2018.
- <sup>13</sup> Mahlknecht J, Horst A, Hernández-Limón G, Aravena R. Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the Río Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management *Hydrol. Process.*, 22, 4736–4751 (2008).
- <sup>14</sup> Olmos MA, Alarcón Herrera MT. Impacto ambiental generado por el uso de osmosis inversa en la remoción de arsénico para la obtención de agua potable, *Revista Ambiental*, 5, 1 (2014).
- <sup>15</sup> Gutiérrez-Espinoza R, Rubio-Arias H, Quintana R, Ortega JA, Pinedo C. Arsenic concentrations in the San Pedro River of Chihuahua, Mexico. *Environmental Health Risk IV, WIT Transactions on Biomedicine and Health V. 11*, 181-186 (2007).
- <sup>16</sup> Gutiérrez-Espinoza R, Rubio-Arias H, Quintana R, Ortega JA, Gutiérrez M. Heavy metals in water of the San Pedro River in Chihuahua, Mexico and its potential health risk. *Inter J of Env Res Public Health*, 5(2), 91-98 (2008).

## CASO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR

Janette M. Murillo-Jiménez, Laura Arreola-Mendoza,  
Ana J. Marmolejo-Rodríguez y Flor Cassassuce

El estado de Baja California Sur (BCS), localizado en el noroeste de México (Figura 5.12), presenta un clima seco (92%), seco-semiseco (7%) y templado subhúmedo (1%), la temperatura media anual es de 18° a 22°C, teniendo hasta 40°C en los meses de mayo a septiembre. La precipitación es menor a 200mm por año<sup>1</sup>. Se presentan lluvias locales en verano e invierno y eventualmente lluvias ciclónicas de diversa intensidad (depresiones a huracanes). La escasa precipitación, la situación geográfica y el clima seco de la región, resultan en poca disponibilidad de agua para el consumo. Los habitantes se abastecen casi en su totalidad de agua subterránea y en algunas regiones se abastecen de agua superficial de presas y manantiales. Esta agua está enriquecida de forma natural de elementos potencialmente tóxicos: arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio y plomo, debido a los yacimientos metálicos presentes en la zona. El agua que eventualmente corre por los arroyos drena hacia el Golfo de California y el Océano Pacífico. El agua que se infiltra en el terreno fluye a través de rocas falladas y sedimentos, recargando los acuíferos. Las rocas y sedimentos de los acuíferos, al contacto con el agua reaccionan químicamente liberando sus componentes, aportando los elementos potencialmente tóxicos al agua.

Estudios científicos han demostrado que el consumo de estos elementos, pueden causar daños a la salud, por lo que instancias internacionales como la Organización Mundial de la Salud, e instancias nacionales como la Secretaría de Salud, han establecido los límites máximos permisibles (LMP) de las concentraciones de estos elementos en un litro de agua.



**Figura 5.12.** Localización de los lugares en donde se ha documentado la presencia de arsénico en el agua del Estado de Baja California Sur, México.

De acuerdo con trabajos publicados sobre la calidad de agua en los acuíferos de BCS (Tabla 5.2), el arsénico se encuentra en concentraciones hasta de 2.270 mg/L en el poblado de Texcalama<sup>2</sup>, siendo de 0.025 mg/L el LMP<sup>3</sup> sugerido por la norma nacional y 0.010 mg/L para la norma internacional<sup>8</sup>. El origen del arsénico en el agua de BCS, se ha asociado a la liberación natural de este elemento de las rocas y sedimentos, a la presencia de este elemento en aguas geotermales (vulcanismo ej. Sta. Rosalía) e hidrotermales (fallas activas), y a la liberación de este elemento de las rocas de forma antropogénica en el proceso de minería.

**Tabla 5.2.** Resultados de las concentraciones de arsénico en agua superficial, subterránea y orina de pobladores en Baja California Sur.

| Lugar   | Arsénico   | Lugar   | Arsénico  |
|---|--|---|---|
| Límite máximo permisible de As en agua para consumo humano:<br>Agua en México (Límite Máximo Permitido) <sup>3</sup><br>Organización Mundial de la salud <sup>8</sup>   | mg/L<br><br>0.025<br>0.010   | Agua subterránea:<br>Cuenca hidrológica Santa Inés- la Muela:<br>2 pozos <sup>11</sup><br>29 pozos <sup>16</sup><br>Agua superficial:<br>Arroyo La Junta, (n=21) <sup>17</sup>  | mg/L<br><br>0-0.030<br>0.005-0.45<br>0.005-0.14   |
| Agua subterránea:<br>Regiones en Baja California Sur:<br>San Ignacio <sup>7</sup><br>Mulegé <sup>7</sup><br>San Juan Londó <sup>7</sup><br>Sierra Las Pocitas <sup>7</sup><br>Los Planes-San Antonio <sup>7</sup><br>El Triunfo (6 pozos) <sup>18</sup><br>San Antonio (18 pozos) <sup>18</sup> | mg/L<br><br>0.030<br>0.010-0.080<br>0.020-0.030<br>0.030-0.4<br>0.10 - 0.50<br>0.040-0.090<br>0.080-0.24 | Orina (ΣArsenicales)<br>Orina (Índice Biológico de Exposición en orina: BEI) <sup>22</sup><br>Cuenca hidrográfica El Carrizal (n=habitantes):<br>El Triunfo (n=23) <sup>10</sup><br>El Carrizal (n=25) <sup>10</sup><br>Melitón Albañez (n=42) <sup>10</sup><br>Cuenca hidrográfica San Juan de Los Planes (habitantes):<br>San Antonio (n=27) <sup>10</sup><br>Juan Domínguez Cota (n=67) <sup>10</sup><br>El Sargento (n=55) <sup>10</sup><br>San Juan de Los Planes (n=36) <sup>10</sup> | µg/L<br>35<br><br>5.92-48.7<br>132-891<br>8.3-230<br><br>12.3-399<br>6.32-130.4<br>6.06-99.5<br>10.43-302 |
| Agua subterránea:<br>Cuenca Hidrológica La Paz:<br>20 pozos <sup>14</sup><br>4 pozos <sup>11</sup><br>2 pozos <sup>4</sup><br>9 pozos urbanos <sup>15</sup><br>15 pozos agrícolas <sup>15</sup>   | mg/L<br><br>0.001-0.046<br>0-0.040<br>0.010<br>0.015-0.056<br>0.015-0.063                                | Desechos de minería y fundición:<br>Residuos Mineros (Límite Máximo Permitido) <sup>21</sup><br>San Antonio <sup>6</sup><br>El Triunfo <sup>5</sup><br>El Triunfo <sup>19</sup><br>El Triunfo <sup>20</sup>   | mg/Kg<br><br>100<br>4420-208000<br>8890-505000<br>3366-96829<br>6080-15000                                |
| Agua subterránea:<br>Cuenca Hidrológica San Juan de Los Planes:<br>7 pozos (área Sn. Antonio) <sup>4</sup><br>42 pozos <sup>2</sup><br>80 pozos <sup>12</sup>   | mg/L<br><br>0.060-1.29<br>0.0036-2.27<br>0.001- 0.80   | Sedimentos:<br>Suelos (Límite Máximo Permitido) <sup>23</sup><br>Terraza aluvial antigua (n=20) <sup>9</sup><br>Pozo de visita (n=9) <sup>9</sup><br>Desembocadura del arroyo Hondo-Las Gallinas El Carrizal<br>Núcleos (n=32) <sup>9</sup><br>Duna (n=3) <sup>9</sup><br>Arroyos <sup>5</sup><br>Arroyos <sup>5</sup>  | mg/Kg<br>22<br>21.3-8690<br>174-694<br><br>7.8-16<br>95.2-484<br>0.1-118000<br>2.8-412                    |
| Agua subterránea:<br>Cuenca hidrológica El Carrizal<br>4 pozos <sup>4</sup><br>19 pozos <sup>11</sup><br>27 pozos <sup>13</sup><br>Cuenca hidrológica La Matanza:<br>5 pozos <sup>11</sup>  | mg/L<br><br>0.020-0.21<br>0-0.180<br>0.006-0.026<br>0-0.020  | Rocas:<br>Recortes de perforación <sup>24</sup>   | mg/Kg<br>232-18948  |

En la región, se presentan rocas con sulfuros de arsénico (arsenopirita) que contienen oro en su estructura cristalina y debido a esto, durante la explotación de oro que se llevó a cabo en la región a finales del siglo XIII, durante 200 años aproximadamente y más recientemente en los años 90s, dejó un sinnúmero de cerros de desechos mineros, a la intemperie y sin confinar (aprox. 800,000 toneladas), que contienen hasta el 30% en peso de óxidos de arsénico (arsenolita)<sup>4</sup>. Los máximos valores se presentan en cenizas de las antiguas plantas de fundición, con concentraciones de arsénico hasta de 500 g/Kg<sup>5</sup>. Estos desechos están siendo dispersados en el ambiente a través del agua y el aire, teniendo concentraciones hasta de 180 g/Kg en sedimentos de un arroyo que nace en la zona minera y arrastra desechos mineros, depositándolos sobre una planicie de inundación en la cuenca de San Juan de Los Planes<sup>6</sup>.

En los años 70's los pobladores de las comunidades del antiguo Distrito Minero El Triunfo-San Antonio, se acercaron a las autoridades, debido a la problemática de salud en sus comunidades tales como: hipertensión, diabetes, y cáncer, encontrando que el agua de los pozos presentaba altas concentraciones de arsénico. Para lo cual fue instalada una planta de tratamiento de agua en el poblado de San Antonio. Por el año de 1996 el Dr. Carrillo realizó estudios de la calidad de agua encontrando concentraciones de hasta 1.29 mg/L de arsénico en esa región<sup>4</sup>.

Otro estudio en el 2005, realizado por la asociación civil Niparáj en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)<sup>7</sup>, llevó a cabo un monitoreo de agua de 500 pozos en el estado, para la determinación de arsénico in situ, por medio de la técnica de colorimetría, con un kit de campo. De los 500 pozos, se identificaron 27 con concentraciones elevadas de arsénico, mismas que fueron corroboradas posteriormente con ICP-MS<sup>7</sup>. Los resultados mostraron que en el 51.2% de los pozos no se detectó arsénico, el 31.8% presentó concentraciones menores a 0.025 mg/L y el 17 % presentó concentraciones mayores a 0.025 mg/L. En cuanto a la norma internacional<sup>8</sup>, el 19.4 % presentó concentraciones mayores a 0.010 mg/L. Posteriormente a este trabajo, Niparáj compartió la información con instituciones académicas con el objeto de trabajar en conjunto para la contextualización de la problemática y su posible mitigación. Los trabajos académicos a la fecha se han enfocado en la obtención de la línea base de arsénico, a través del estudio de sedimentos en algunas cuencas hidrográficas<sup>4,5,6</sup>, en la caracterización geoquímica de suelos y sedimentos en las antiguas zonas mineras<sup>9</sup> y la identificación de las concentraciones de arsénico en orina, de habitantes de las antiguas zonas mineras y aledañas a éstas<sup>10</sup>. El estudio en poblaciones cercanas a la cuenca hidrológica San Juan de Los Planes y El Carrizal, mostró que 33% de los participantes presentaron concentraciones urinarias mayores a la concentración de 35 µg/L considerada como referencia<sup>22</sup>; resultados que han permitido conocer que hay poblaciones con concentraciones altas de arsénico tanto en las zonas de la antigua minería como en zonas aledañas, influenciadas también por la minería. Habitantes de poblaciones expuestos a arsénico en las cuencas hidrológicas de El Carrizal (poblado de El Triunfo) y en la cuenca hidrológica de San Juan de Los Planes<sup>10</sup>, han exigido a las autoridades la instalación de plantas de tratamiento para la remoción de arsénico, poblaciones que a la fecha cuentan con plantas de tratamiento, sin embargo, habitantes de otras poblaciones y rancherías dispersas siguen consumiendo agua con arsénico en concentraciones por arriba de la normatividad<sup>11</sup>.

En el estado de BCS, la participación de asociaciones civiles y de sus pobladores ha sido determinante para visibilizar esta problemática, la cual se ha ido conociendo a través de la socialización de la información. En el 2013 la asociación civil Niparáj invitó a participar al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR-CONACYT), para llevar a cabo un monitoreo de 30 pozos de agua potable en la cuenca hidrológica de La Paz. Los resultados de este trabajo mostraron que, 3 de los 20 pozos analizados presentaron concentraciones de arsénico mayores a 0.025 mg/L, en donde 2 de estos pozos abastecen a las comunidades de Chametla y El Centenario. Esta información se compartió de inmediato a las autoridades, sin embargo, no se llevaron a

cabo acciones para la solución del problema, sino hasta que los pobladores afectados, a través de reuniones con las autoridades y ejerciendo su derecho a agua de calidad por medios legales, obtuvieron que, en el 2017, se instalará una planta de tratamiento para la remoción de arsénico. Sin embargo, recientemente en Julio del 2018, la empresa EoZ Filtros de Agua identificó que la concentración de arsénico en el agua de la llave de una casa de Chametla era mayor a 0.025 mg/L, por lo que se debe monitorear la eficiencia en el proceso de remoción del metaloide en ésta área. Posteriormente, al estudio por parte de Niparáj y CIBNOR, Niparáj y el Observatorio Ciudadano del Agua de La Paz A.C. (OCAS-LA PAZ), continúan con el monitoreo de pozos en el acuífero de La Paz. Los resultados más recientes, fueron presentados a las autoridades, los cuales mostraron que 5 pozos no cumplen con la normatividad, en donde se observa por ejemplo que el pozo Pino Payas (pozo No.138), que abastece a parte de los habitantes de la ciudad de La Paz, presenta concentraciones de arsénico, sólidos disueltos totales, cloruros y sodio, mayores a la normatividad, para lo cual se hizo la recomendación al OOMSAPAS La Paz el cierre del pozo.

En el Estado de BCS, en los últimos años, la sociedad ha estado muy atenta al cuidado del agua, por lo que se conformó un colectivo integrado por ciudadanos y alrededor de 30 asociaciones civiles, denominado Frente en Defensa del Agua y La Vida. Este colectivo ha luchado por años, para impedir que se instalen empresas de minería para la explotación de oro a cielo abierto. La presencia de este tipo de minería en el estado sería devastadora, ya que atenta contra la calidad del recurso agua, el cual es de vital importancia y muy escaso por las condiciones de aridez, y por consiguiente atenta contra la calidad de vida de los pobladores poniendo en riesgo su salud. El agua en BCS además de que en muchas regiones ya se encuentra contaminada por metales potencialmente tóxicos presentes en las rocas y sedimentos de los acuíferos, está siendo influenciada además por antiguos desechos mineros, los cuales están enriquecidos de metales tóxicos, que, al contacto con las lluvias, provocan lixiviados y escorrentías contaminando el agua y los acuíferos<sup>11</sup>. Estos desechos no solo tienen impacto en las regiones mineras, sino también en zonas aledañas debido a que estos materiales están siendo dispersados en el ambiente a través del agua y el aire<sup>6</sup>.

Actualmente, se ha logrado la instalación de plantas de tratamiento de agua para remoción de arsénico en los poblados de San Antonio, El Triunfo, Juan Domínguez Cota, Chametla y El Centenario. Sin embargo, aún falta, en un sinnúmero de cuencas en el estado de BCS, un sistema de monitoreo continuo de este elemento que es sumamente tóxico, así como de otros elementos que se han encontrado enriquecidos y que son de riesgo para la salud como el cadmio<sup>11</sup>. BCS presenta un alto índice de cáncer, obteniendo los primeros lugares a nivel nacional. Es un tema de salud pública que merece atención, y que en diversos aspectos puede estar directamente relacionado a la calidad del agua. Las dependencias de gobierno cuentan con datos que no son suficientes para tener un diagnóstico de la problemática y poder dar un seguimiento. Esto es en parte relacionado a que no disponen de los recursos suficientes para llevar a cabo monitoreos en todo el estado, no se cuenta con un laboratorio certificado para análisis químicos, no están familiarizados con las tecnologías modernas, relativamente económicas para mejorar la calidad del agua, además de que las dependencias han estado trabajando de forma aislada, sin embargo, se ha tenido un avance de participación conjunta. En BCS es de vital importancia que exista una mayor colaboración de las autoridades con la sociedad civil, organizaciones de sociedad civil y la academia, quienes tienen un gran interés en coadyuvar para la solución de esta problemática, y así poder lograr acciones que se vean reflejadas en una mejor salud y calidad de vida de los pobladores de BCS.

## Referencias

- 1 INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas Escala 1:1 000 000, serie I <http://sdemarn.bcs.gob.mx/docs/anuario2015.pdf> (2018).
- 2 CONAGUA. Estudio de Caracterización de la Intrusión Salina en el acuífero de Los Planes, B.C.S. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Gerencia Estatal En Baja California Sur. Subdirección Técnica Comisión Nacional del Agua. 276 pp. (2003).
- 3 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, Diario Oficial, México.
- 4 Carrillo-Chávez A, Drever JI, Martínez M. As content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environ Geol* 39:1295-1303 (2000).
- 5 Romero-Guadarrama JA. Geoquímica de As, Hg, Pb, y Zn, y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del Distrito Minero El Triunfo, BCS., México. Tesis de Maestría CICIMAR-IPN, La Paz, B.C.S. México (2011).
- 6 Posada-Ayala IH. Geoquímica Ambiental del Distrito Minero San Antonio, Sedimentos de Los Arroyos de La Cuenca de San Juan de Los Planes y Plataforma Continental de Bahía La Ventana, BCS, México. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN, La Paz, B.C.S. México (2011).
- 7 Niparajá y CONAGUA. Estudio de la calidad del agua en 500 pozos de Baja California Sur. Reporte de la Sociedad de Historia Natural Niparajá y Comisión Nacional del Agua. [http://niparaja.org/file/2015/06/ESTUDIO-DEL-ARSENICO-EN-BCS\\_2004-20051.pdf](http://niparaja.org/file/2015/06/ESTUDIO-DEL-ARSENICO-EN-BCS_2004-20051.pdf) (2005).
- 8 OMS, Organización Mundial de la Salud, Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. 398 pp. (2006).
- 9 Sánchez-Martínez MA. Variación vertical del contenido de elementos potencialmente tóxicos en la zona minera El Triunfo (B.C.S.) y en la desembocadura de su arroyo principal en el Océano Pacífico. Tesis de Doctorado, CICIMAR-IPN, La Paz, BCS., México (2013).
- 10 Colín-Torres CG, Murillo-Jiménez JM, Del Razo LM, Sánchez-Peña LC, Becerra-Rueda OF, Marmolejo-Rodríguez AJ. Urinary arsenic levels influenced by abandoned mine tailings in the Southernmost Baja California Peninsula, Mexico. *Environ Geochem Health* 36: 845-864 (2014).
- 11 Velázquez-Pedroza K. Elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Sb Y Zn) en agua de pozos, fuentes de aporte y su migración en las cuencas hidrológicas El Carrizal y la Matanza, BCS. México. Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional-CICIMAR (2018).
- 12 Niparajá y GA. Restos de la Minería Histórica en los Poblados de San Antonio y El Triunfo, B.C.S. Reporte de la Sociedad de Historia Natural Niparajá A.C. y Guardianes del Agua A.C. [http://niparaja.org/file/2015/06/Caso\\_SAA\\_TF\\_L.pdf](http://niparaja.org/file/2015/06/Caso_SAA_TF_L.pdf) (2010).
- 13 Niparajá. Monitoreo de Calidad del Agua en la cuenca de La Paz- El Carrizal (Arsénico y Hierro), BCS. Reporte de la Sociedad de Historia Natural Niparajá A.C. <http://niparaja.org/file/2015/06/Monitoreo-calidad-agua-La-Paz-Carrizal-As-y-Fe-con-3er-muestra-pu%CC%81blico.pdf> (2012).
- 14 Cruz-Falcón A, Murillo-Jiménez JM, Troyo-Dieguez E, Nava-Sánchez EH. Distribución de sales y arsénico en el acuífero de La Paz, B.C.S., México. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2 (2): 56-75 (2017).
- 15 OCAS-Niparajá. Monitoreo de calidad del agua. Acuífero de La Paz (2013-2018). Presentación de la Sociedad de Historia Natural Niparajá A.C. y el Observatorio Ciudadano del Agua y Saneamiento de La Paz, en Reunión del Consejo de Cuenca del Estado de BCS. 27 de Julio, La Paz, BCS, México (2018).
- 16 Wurl J, Mendez-Rodríguez L, Acosta Vargas B. Arsenic content in groundwater from the southern part of the San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, Mexico. *J Hydrol* 518, 447-459 (2014).
- 17 Wurl J, Imaz-Lamadrid M, Mendez-Rodríguez L, Acosta-Vargas B. Arsenic Concentration in the Surface Water of a Former Mining Area: The La Junta Creek, Baja California Sur, México. *Internat J Environ Res Public Health* 15, 437 (2018).
- 18 Naranjo-Pulido A. Estudio de la contaminación por arsénico en agua, suelo y plantas de la región del cabo en Baja California Sur, México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias. UNAM. 84 p. (2004).
- 19 Magdaleno-Rico A. Peligrosidad de los residuos mineros históricos del Distrito Minero San Antonio-El Triunfo en la Paz Baja California Sur y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas. México, D. F., México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura (2014).
- 20 Ahumada-Mexía R. Identificación de residuos tóxicos mineros por percepción remota y su verificación geoquímica en El Triunfo (BCS): Propuesta metodológica para priorizar acciones de restauración. Instituto Politécnico Nacional-CICIMAR, Marzo (2017).
- 21 NOM-157-SEMARNAT-2009, NORMA Oficial Mexicana que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.html>
- 22 ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values (TLVs) for chemical substances and physical agents and biological exposure indices (BEIs) 210 p. (2017).
- 23 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. NOM-157-SEMARNAT-2009, NORMA Oficial Mexicana que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- 24 Ziegler-Rivera FRA. Ocurrencia natural del arsénico en el Distrito Minero San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México, México. (2014).

## EVALUACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN COMUNIDADES RURALES (PROSSAPYS). CÁNTARO AZUL - BID

Mónica N. Camacho-Galván y Fermín Reygadas Robles Gil

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es una institución fundamental que apoya los municipios en su responsabilidad de proveer los servicios de agua potable, drenaje y tratamiento de aguas residuales a nivel nacional. Esta institución, por medio del Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (PROSSAPYS), atiende a localidades menores de 2,500 habitantes y excepcionalmente a localidades de entre 2,500 y 15,000 habitantes dentro del contexto rural. El PROSSAPYS cuenta con apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) desde 1999 y cuenta con tres componentes principales: a) Infraestructura, b) Atención Social y Participación Comunitaria, y c) Desarrollo institucional y Fortalecimiento a Ejecutores<sup>1</sup>. Los comités de agua en las localidades rurales también adquieren un papel fundamental en la gestión comunitaria de los sistemas de agua potable y son clave en el suministro de este elemento para su uso doméstico.

En 2014, la organización civil Cántaro Azul<sup>2</sup>, a petición del BID y con apoyo de CONAGUA, realizó el estudio *Levantamiento de Encuestas Socio-económicas y Entrevistas a Autoridades de Comités de Agua en Comunidades Rurales de México*, que tuvo como objetivo identificar los factores que contribuyen a un funcionamiento sostenible de los sistemas de agua construidos con recursos del PROSSAPYS.

Para ello, se realizaron encuestas, entrevistas y análisis de calidad de agua en 300 localidades rurales de 29 estados del país (Tamaulipas, Tlaxcala y Ciudad de México quedaron fuera de este estudio), que forman parte de las 5,528 localidades en las que se construyeron sistemas de agua como parte del PROSSAPYS entre los años 1998 y 2007. En cada localidad se seleccionaron de manera aleatoria nueve hogares para aplicar las encuestas y se concertó una cita con el comité de agua u organismo operador para realizar las entrevistas. Además, se realizaron análisis de calidad de agua en tres casas y en el tanque de almacenamiento del sistema de agua. Se midieron 18 variables de calidad de agua en cada localidad, incluyendo concentraciones de arsénico y fluoruro.

Mediante las encuestas se obtuvo información sobre las características generales de la vivienda y sus miembros (educación, empleo, salud), los servicios básicos, la calidad del servicio y el funcionamiento de los sistemas de agua y saneamiento. La entrevista a los comités incluyó aspectos de planeación y comunicación interna, comerciales y contable-financieros, técnico-operativos y de relación con los usuarios, entre otros.

En cuanto a la calidad de agua, principalmente se observaron problemas de contaminación microbiológica, y por manganeso, hierro, arsénico y fluoruro.

En este sentido, el 38% de los comités reportaron tener algún método o tecnología de potabilización y utilizarlo en la actualidad, el método mayormente utilizado fue la cloración. Sin embargo, solo se detectaron niveles de cloro adecuados en el 17% de las muestras de agua colectadas, con referencia a la NOM-127-SSA1-1994<sup>3</sup>. Además, en un 41% de las muestras hubo presencia de *E. coli*, es decir, el agua contenía bacterias indicadoras de contaminación fecal. Lo cual es muy alarmante, ya que las enfermedades diarreicas son la principal causa de morbilidad en niñas y niños menores de 5 años<sup>4</sup>.

Para el manganeso, se sobrepasó el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994 en el 71% de los casos, mientras que, el hierro estuvo por arriba del límite en el 37% de las muestras.

Para el arsénico, el 19% de las muestras se encontraron fuera de la modificación a la NOM-127-SSA1-1994. En esta norma se indica que el límite para la concentración de este elemento es de 0.025 mg/L, mientras que en este estudio se encontraron concentraciones de hasta 0.3 mg/L en Coahuila, Durango y Guanajuato. Como se habla en otros capítulos de este volumen, esto causa repercusiones muy serias en la salud. Algunos síntomas que las personas que utilizaban agua para higiene personal, con altas concentraciones de este elemento, fueron la caída de cabello e irritación severa en la piel.

Respecto a la presencia de fluoruro, el 33% de las muestras se encontraron fuera de la NOM-127-SSA1-1994. Aquí el valor de referencia es de 1.5 mg/L como límite máximo, y en este estudio se encontraron concentraciones entre 8.2 - 9.1 mg/L en Colima, Baja California, Durango y Chihuahua.

Por otro lado, los aspectos operativos y organizacionales muestran que el 79% de los sistemas instalados continuaban en funcionamiento hasta 2014. Sin embargo, el 63% no contaba con un plan de mantenimiento. Esto, aunado a la falta de acompañamiento, de asesoría técnica y a que solo el 34% de los comités recibió algún tipo de capacitación, ocasiona en muchos casos el abandono de la infraestructura.

Los resultados de este estudio también arrojaron que el 74% de los sistemas son gestionados por comités de agua que no reciben una remuneración por su trabajo y en su mayoría no están constituidos legalmente. La equidad de género tampoco es una característica común en los comités entrevistados, ya que, sólo en el 21% de los comités los puestos principales (presidencia, secretaría o tesorería) estaban ocupados por mujeres. Hay que poner atención en estas cifras, ya que, el reconocimiento de los comités y la inclusión de las mujeres en los procesos participativos desde el diagnóstico hasta la operación y administración de los sistemas son fundamentales para lograr la sostenibilidad en el suministro de agua.

En conclusión, los principales resultados encontrados muestran que la calidad de agua ofrecida por los sistemas no cumple los parámetros de calidad establecidos por normas nacionales e internacionales y por lo tanto no contribuye a alcanzar el Derecho Humano al Agua y Saneamiento. Hace falta reconocer el gran trabajo que han realizado los comités de agua para brindar un servicio y brindarles acompañamiento, asesoría técnica y capacitación para que la infraestructura no se abandone rápidamente. Si bien, se ha hecho un gran esfuerzo por promover la participación social en las distintas etapas del PROSSAPYS, los resultados muestran que no se ha logrado incluir equitativamente a las mujeres en la gestión de los sistemas de agua por medio de los comités de agua. Por todo esto, se evidencia que hace falta un largo camino que recorrer y quizás un cambio de paradigma en el abordaje de los problemas que representa este sector para proveer soluciones más efectivas.

## Referencias

- 1 CONAGUA, BID. Manual de Operación y Procedimientos. Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (PROSSAPYS IV). México (2017).
- 2 Fundación Cántaro Azul, A.C. Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19, interior A, Los Alcanfores, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. <http://www.cantaroazul.org/>
- 3 DOF Diario Oficial de la Federación. Modificación a la 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. México (2000).
- 4 SUIVE/DGE/Secretaría de Salud/Estados Unidos Mexicanos (2017) Consultado en línea: [http://www.epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/2017/morbilidad/grupo/veinte\\_principales\\_causas\\_enfermedad\\_grupo\\_uno\\_4.pdf](http://www.epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/2017/morbilidad/grupo/veinte_principales_causas_enfermedad_grupo_uno_4.pdf)

## CAPÍTULO 6.

### VOCES Y TESTIMONIOS DE LA CIUDADANÍA Y LA SOCIEDAD CIVIL

Juan Manuel Ledón, Gibrán Mena, Alejandra Fonseca,  
Mauricio León Arce y Mariana Cárdenas González



**Imagen 6.1.** Itzel Jazmín Rico Vázquez. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

“Mi sueño desde que soy pequeña es ser policía... y quiero alcanzar mi sueño.”

- *Itzel Jazmín Rico Vázquez; Pozo Ademado, San Luis de la Paz, Gto.*

En este capítulo se recogen algunas voces y testimonios de personas de la ciudadanía y la sociedad civil, directamente relacionadas con la problemática de contaminación del agua subterránea por fluoruro y/o arsénico.

Para su realización, se llevaron a cabo entrevistas<sup>1</sup> a habitantes y representantes de organizaciones de base en las localidades de Pozo Ademado (municipio de San Diego de la Unión) y Pozo Hondo / La Vaciada (municipio de San Luis de La Paz) en el Estado de Guanajuato; así como en Salitral de Carrera (municipio de Villa de Ramos) y La Reforma (municipio de Salinas de Hidalgo) en el Estado de San Luis Potosí.

A continuación, se presentan algunas reseñas y frases tomadas de las personas entrevistadas:



**Imagen 6.2.** Juan Carlos Zesati, sacerdote diocesano. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"En las comunidades de San Luis de la Paz tenemos un problema muy fuerte de contaminación del agua por fluoruro y arsénico... Vemos muy altos niveles de fluorosis dental y fluorosis esquelética (y) un daño muy común es la insuficiencia renal. Hay veces que la gente tiene que pagar con su vida las consecuencias del agua contaminada. El sistema de salud no cubre las diálisis y es prácticamente imposible que la gente de las comunidades pueda cubrir su costo. Muchas veces ellos simplemente lo dejan. Es decir, saben que van a morir... El agua que consume la gente no es agua: es veneno."

"Ingenuamente, llevamos la información (sobre la calidad del agua de pozos que abastecen a comunidades de la zona) a las autoridades, pensando que se pudiera hacer una suma de esfuerzos por el bien de la gente. Nos sorprendimos muchísimo porque no hubo respuesta y nos fuimos dando cuenta que había una negación del problema; pero una negación voluntaria, no por ignorancia..."

"Ante las comunidades y a nivel público no se acepta que esta agua está contaminada, porque eso equivaldría a ir al fondo del problema y a tener que, prácticamente, cancelar pozos que no deberían estar ahí... y que (ante la explotación de los acuíferos para la actividad industrial y agroindustrial) son los que están sosteniendo un modelo de desarrollo que, a mi juicio, no es verdadero desarrollo; porque se está devastando no solamente la generación actual, que se está consumiendo con estas enfermedades, sino que le estamos quitando el agua a generaciones ya muy próximas."

- Juan Carlos Zesati, sacerdote diocesano; San Cayetano, San Luis de la Paz, Gto.



**Imagen 6.3.** Ma. Magdalena Nájera Morales. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"Antes no se veían tanto los problemas (relacionados al agua) porque la gente aquí sacaba agua de los pozos que cada quién tenía en su casa y no eran tan profundos. O si había problemas, no lo sabíamos. Después se hizo el pozo de agua 'potable' y la gente empezó a consumir y sacar agua de la llave. Se hicieron estudios a esa agua y dijeron que tenía arsénico y que no era apta para consumirse. Aun así, la gente la estaba consumiendo..."

"Aquí de lo que padece mucho la gente es de los dientes. En esta comunidad la mayoría de las personas tiene los dientes amarillos, manchados... y en los alrededores no. Aquí también se padece mucho la insuficiencia renal; ha habido muchos casos de cáncer, presión arterial y diabetes."

"Aquí la mayoría de la gente tiene sus prótesis (dentales) y ya no puede morder con la misma seguridad... y no es bonito. Yo traigo dos dientes que no son míos."

- Ma. Magdalena Nájera Morales, ama de casa; Salitral de Carrera, Villa de Ramos, SLP.



**Imagen 6.4.** Javier Arellano López. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"Me acuerdo de cuando tenía cinco años y los chiquitines de la escuela de esa edad nos bañábamos en un ojo de agua de aquí hacia abajo. Era una especie de río, de manantial. Y hacíamos un hoyito en un lado (de ese lugar) para tomar agua todos los niños de la escuela... hace aproximadamente 58 años."

"Ahora tomamos agua de un pozo que se hizo, pero nos cuentan que está contaminada. Con la ayuda del gobierno nos hicieron otro pozo profundo, pero cuentan que también está mal esa agua. Entonces, ahora no sé qué vamos a hacer..."

"Unas personas que trabajan en el centro de salud llevaron a analizar un depósito (de agua) a San Luis Potosí y de ahí empezaron a decir que el agua está contaminada. Y pues queremos que ya no siga sucediendo eso... ¡que no sigamos tomando esa agua contaminada!"

- Javier Arellano López, agricultor; Salitral de Carrera, Villa de Ramos, S.L.P.



Imagen 6.5. Santiago Cisneros Rodríguez. (Foto por Juan Manuel Ledón, 2018)

"Antes, la gente tomaba agua de diferentes norias o pocitos a cielo abierto que se compartían por grupos de familias. Luego se fue acabando el agua de esas norias y se perforó un pozo profundo. Desde entonces tomamos agua de ahí. Se creía que era más limpia porque es profundo... pero mire cómo tengo mis dientes, ya ni dientes tengo yo."

"Antes estaba uno conforme con tener (agua), aunque fuera de la calidad que fuera. Por los estudios que se han hecho, se sabe que tiene mucho 'flúor' o algo así (fluoruro) y que no es apta para el consumo humano."

"Aquí en Reforma tenemos (ahora) una purificadora que abastece cinco días a la semana; pero aún así, por estudios, se sabe que el agua no es muy limpia, que no se le quita todo lo que perjudica. Hay mucho enfermo por el agua... Afecta mucho los huesos. Hay muchas personas que ya no pueden caminar."

- Santiago Cisneros Rodríguez, agricultor; La Reforma, Salinas de Hidalgo, SLP.



**Imagen 6.6.** Ana María Ramírez Mata. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"El problema en mi familia son los dientes, que se les hacen como negros, 'nejos' y amarillos... y dicen que el problema es el agua. Yo me enfermé de los riñones y desde entonces no tomo agua de la llave, pero sí cocino. Todos mis alimentos son (preparados) con agua de la llave por lo cara que está (el agua embotellada). Un garrafón nos cuesta 40 pesos y dura la mitad de la semana."

"Se han hecho muchos estudios al agua del pozo. También se hicieron estudios al agua de garrafón para comparar. El agua de pozo tenía mucho fluoruro y mucho arsénico y la del garrafón, poquito."

"Hasta hoy, las cisternas (de cosecha de lluvia) son la única esperanza que yo tengo para tomar agua limpia... y saludable."

- Ana María Ramírez Mata, ama de casa; La Vaciada, San Luis de la Paz, Gto.



**Imagen 6.7.** Ma. Carmen Castro Mata. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"Siempre he vivido aquí en la comunidad y hace más de 9 años que estamos trabajando sobre el problema del agua. El agua que consumimos tiene sobre todo fluoruro y vemos el efecto en muchas personas: la fluorosis dental y la fluorosis esquelética. El problema del riñón se está dando mucho en toda esta región."

"Van dos diplomados que he recibido sobre el problema del agua subterránea (por parte) del investigador (Marcos) Adrián Ortega de la UNAM de Querétaro. Lo que hemos estado haciendo es informar a la gente y a la comunidad sobre este problema. Aquí en la comunidad tenemos agua una vez por semana. Tenemos poca y hay que cuidarla."

"Una alternativa inmediata es la cosecha de agua de lluvia en cisternas de ferrocemento, que captan 12 mil litros de agua, sobre todo para cocinar y para tomar, ya que esa agua no tiene los contaminantes que tiene el agua entubada. Es una de las alternativas inmediatas. No es la solución. Ha habido propuestas también para regular los pozos en el Estado y que los que usan el agua para la agricultura, como los grandes invernaderos que hay alrededor, puedan cosechar el agua de lluvia y ahorrar ellos también. Pero necesitamos hacerlo como una iniciativa más amplia. Conscientemente estamos cosechando el agua para poder usarla y para obtener mejor salud."

"A mí se me han caído los dientes sin raíz y está pasando a muchas personas de diferentes comunidades. Esto afecta nuestra salud y nuestra autoestima. Yo creo que necesitamos organizarnos y unirnos más, tanto en esta cuenca como con otras cuencas y otras organizaciones. Unidos podemos darnos más fuerza y lograr más."

- Ma. Carmen Castro Mata, trabajadora social promotora de salud, SECOPA<sup>2</sup> y CODECIN<sup>3</sup>, Pozo Ademado, San Diego de la Unión, Gto.



Imagen 6.8. Saúl Juárez. (Foto por Gibrán Mena, 2018)

"La idea de dignificar la vida en las comunidades fue lo que más me llamó la atención... promover el desarrollo de las comunidades a través de la formación de las personas. Para mí, el proyecto - de captación, potabilización, etc. - no es lo más importante, sino cómo crecen las personas a través de ese proyecto, cómo entienden el sentido de los proyectos... Nos tiene que llevar a crecer a todos como personas - en entendimiento, en razonamiento, en comprensión, en valores - para que nuestra comunidad florezca o al menos vea una luz más allá de los problemas que estamos viviendo."

"Creo que, en la medida en la que crezcan las personas, pueden crecer también las formas de ir solucionando los problemas... desde una perspectiva de comunidad y a través de la comunidad. El papel de las organizaciones debe justo apoyar a que las personas puedan visualizarse a sí mismas como protagonistas de su propio desarrollo."

- Saúl Juárez, coordinador de proyectos comunitarios en Caminos de Agua; San Miguel de Allende, Gto.



Imagen 6.9. De izq. a der.: Juan Carlos Zesati, Ma. Luz Villafuerte Cruz, Zeneida Álvarez Araiza y Fabiola Pérez Álvarez en San Cayetano, San Luis de la Paz, Gto. (Foto por Juan Manuel Ledón, 2018)

"Al conocer otras experiencias de la región, empezamos a trabajar con las cisternas de ferrocemento, que son cisternas de autoconstrucción en las que varias familias van participando... y esto va de la mano con un proceso de formación, de toma de conciencia y de organización comunitaria. Este proceso nos ha permitido (desarrollar) no solamente una solución técnica, sino - sobre todo - un fortalecimiento de la dimensión social... Las comunidades han tomado en sus manos una parte de la solución y esto ha generado autonomía de las personas... y que ellos sientan que pueden también ofrecer la solución a otras familias... La cosecha de agua de lluvia es una alternativa realmente viable... Si un bebé comienza a tomar agua limpia y fácilmente accesible para la familia, realmente estamos haciendo una prevención inmensa."

- Juan Carlos Zesati, sacerdote diocesano; San Cayetano, San Luis de la Paz, Gto.

"Nosotros, la alternativa que buscamos fue acercarnos a CUVA-PAS<sup>4</sup>... unirnos y trabajar juntos. Somos catorce familias las que estamos unidas y dispuestas a trabajar. Nos ayudamos entre todos a hacer (la cisterna) para una familia y luego otra y así... todos juntos y echándole ganas. Más que nada lo hacemos por los hijos y por los nietos. Lo que he visto es que cosechando agua de lluvia hay soluciones rápidas para la prevención. Se han construido 156 cisternas<sup>5</sup> y a cada una le caben 600 garrafones equivalentes a 19 mil pesos de agua. Con una vez que se llene, se recupera el trabajo que pusieron para hacer la cisterna. Eso es algo significativo en la economía."

- Ma. Luz Villafuerte Cruz "Lucha"; Vergel de Bernalejo, San Luis de la Paz, Gto.

"Lo primordial son los niños y por ellos hay que echarle ganas."

- Fabiola Pérez Álvarez; Terreros de la Concepción, San Luis de la Paz, Gto.

## Notas y referencias

- <sup>1</sup> Las entrevistas fueron realizadas por integrantes de SocialTIC, el Fondo para la Comunicación y Educación Ambiental y Cántaro Azul, con el apoyo y la colaboración de Caminos de Agua en el Estado de Guanajuato y de la Organización para Restaurar el Medio Ambiente y la Armonía Social (ORMA) en el Estado de San Luis Potosí, a finales de julio de 2018.
- <sup>2</sup> SECOPA: Servicios Comunitarios Pozo Ademado.
- <sup>3</sup> CODECIN: Coalición de la Cuenca Independencia.
- <sup>4</sup> CUVA-PAS: Comunidades Unidas por la Vida y el Agua, Pastoral Social.
- <sup>5</sup> Las cisternas se han construido con apoyos para los materiales, principalmente del Club Rotario y de Caminos de Agua en Guanajuato.

# CAPÍTULO 7. OPORTUNIDADES

## AGUA DE LLUVIA

Dylan Terrell, Casilda Barajas Rocha, Arturo González Herrera, Nabani Vera, Yoselin Becerril Fuentes, Tirian Mink y Paloma Mejía Lechuga

### La experiencia de Caminos de Agua

Los sistemas de captación de agua de lluvia, como cualquier tecnología, son herramientas convenientes, pero no son soluciones completas por sí mismas. El éxito depende de la participación de la comunidad y de su apropiación. Las soluciones exitosas para temas de agua se basan en la intersección de tecnologías de bajo costo validadas e impulsadas por las comunidades locales a través de un modelo de implementación. La asociación emplea varios modelos de sistemas de captación de agua de lluvia. El que ha resultado más efectivo es el que aprendimos del Centro de Desarrollo Agropecuario, A.C. (CEDESA), ubicado en Dolores Hidalgo, Guanajuato. Este sistema se compone de la construcción de una cisterna de ferrocemento de 12,000 litros de capacidad; el cual complementamos con un pretratamiento que llamamos “primer separador” y un filtro cerámico de agua para cada hogar. El sistema asegura que las familias tengan acceso al agua para el consumo humano (beber y cocinar) durante todo el año. Caminos de Agua busca apoyar a las comunidades más afectadas por la contaminación de arsénico y fluoruro, así como a las que presentan mayor escasez de agua en sus pozos.

Gracias a CEDESA se aprendió cómo construir una cisterna de ferrocemento<sup>1</sup> y junto con ellos se desarrolló un método de implementación impulsado por la comunidad local<sup>1</sup>. La comunidad participa activamente de manera voluntaria en cada proyecto. Se organizan mediante comités y toman las decisiones basadas en las necesidades colectivas y según su capacidad de participación respecto a los beneficiarios, la ubicación, la organización y el desarrollo del proyecto. Es digno de destacar y reconocer la participación y entrega de las mujeres en estos procesos, quienes se comprometen a llevarlos a término y cuya participación es fundamental. Producto de la colaboración articulada desde CEDESA, entre muchas organizaciones, hoy en día Caminos de Agua trabaja en conjunto con las organizaciones de base: Servicios Comunitarios de Pozo Ademado (SECOPA), El Centro Comunitario de San Cayetano y Comunidades Unidas por la Vida y el Agua - Pastoral Social (CUVA-PAS).

### La perspectiva de Caminos de Agua

El agua hervida y los filtros de agua domésticos típicos no eliminan los contaminantes disueltos como el arsénico y el fluoruro. Desde nuestra perspectiva, las únicas opciones comerciales viables y fácilmente disponibles son los sistemas de filtro de ósmosis inversa o la compra de agua embotellada de una fuente confiable. Sin embargo, ambas opciones son inaccesibles para la mayoría de la gente que consume agua contaminada por estos elementos.

Por otro lado, el agua de lluvia representa una fuente de agua que está disponible de manera gratuita en casi todo el mundo, inherentemente libre de contaminantes como arsénico y fluoruro y cuya utilización contribuye a evitar la disminución de los niveles freáticos de los acuíferos, los cuales están siendo rápidamente agotados en México y el mundo. Una de las mejores alternativas para mitigar este *estrés hídrico*

es la captación de agua de lluvia, la cual sólo requiere el bajo costo que implica conducirla y almacenarla y resulta más que suficiente para satisfacer las necesidades de consumo, incluso en comunidades con clima semiárido. En combinación con un filtro básico para eliminar los microorganismos patógenos, el agua de lluvia se convierte en una fuente de agua segura y saludable, de calidad similar a la tratada con ósmosis inversa o al agua embotellada, pero a una centésima parte del costo<sup>2</sup>.

Cosechar, almacenar y tratar el agua de lluvia permite mejorar la salud de la comunidad, a través del consumo de agua de mejor calidad; reduce el *estrés hídrico* y brinda el control a las personas sobre sus recursos hídricos, aliviando la creciente inseguridad que presentan los habitantes de comunidades donde la contaminación del agua aumenta. Captar y consumir agua de lluvia, apoya la vida desde un punto de vista ecológico, sostenible y saludable que tendrá impacto en muchas generaciones.

### La experiencia y perspectiva del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

El agua de lluvia, como parte del ciclo hidrológico, ha sido evaporada y limpiada de sustancias suspendidas y disueltas que antes contenía. Aunque en su viaje a través de la atmósfera y precipitación hacia la tierra puede arrastrar y disolver diferentes sustancias y partículas (dependiendo si la región es urbana o rural), en general tiene excelente calidad para uso y consumo humano a bajo costo. El agua de lluvia se puede aprovechar a escala colectiva y doméstica. En los últimos años, IMTA ha participado con éxito en diversas regiones del país en la adaptación, transferencia y adopción de tecnologías apropiadas de abastecimiento de agua y desinfección para consumo humano<sup>3,4</sup>. Una de las tecnologías es la cisterna tipo capuchino con sistema de captación pluvial a escala doméstica (Imagen 7.1). Como opciones de desinfección a escala doméstica para agua de lluvia captada en techos se encuentran la desinfección solar y con radiación ultravioleta mediante equipos de fabricación local.

En algunas regiones de México, cuyas fuentes principales de abastecimiento contienen arsénico, fluoruro u otros contaminantes, aún en aquellas de baja precipitación, el agua de lluvia –por su calidad- puede considerarse un recurso valioso utilizable para consumo humano porque reduce los riesgos a la salud por la ingestión de esos contaminantes. Si bien es cierto que el agua de lluvia, en su recorrido por las superficies de techos donde se capta, escurre o se almacena, se puede contaminar con partículas suspendidas y microorganismos, el tratamiento de purificación usando filtros de arena, desinfección solar o radiación ultravioleta con equipos de fabricación local<sup>4,5</sup>, resulta sencillo, efectivo y barato.

La difusión, transferencia, adaptación y seguimiento de las tecnologías de captación y purificación de agua de lluvia enfrentan retos técnicos, económicos y sociales<sup>4,5</sup>, incluyendo los programas y estrategias de acción institucionales, como la falta de recursos financieros, normatividad técnica y/o certificación, capacitación, promoción de la participación y organización social.



Imagen 7.1. Captación pluvial y cisternas escala doméstica en Morelos

### La experiencia y perspectiva de Isla Urbana

Isla Urbana trabaja desde el año 2009 en el diseño e instalación de sistemas de captación de lluvia como una fuente de abasto de agua sostenible<sup>6</sup>. El proyecto comenzó en la “Zona cerriles” al sur de la CDMX, donde se encuentra la mayor cantidad de viviendas sin conexión a la red de distribución de agua potable en la urbe. El trabajo inició como un emprendimiento social, el cual buscaba dar solución a una de las problemáticas más apremiantes para las familias de la zona. Aunque el impacto ha aumentado considerablemente con los años, en un principio se trabajó a una muy baja escala de viviendas, lo que permitió dar seguimiento cercano al desarrollo del sistema y de su adopción por parte de los usuarios.

El sistema busca aprovechar la infraestructura existente en los hogares, los cuales son en su amplia mayoría de familias con escasos recursos. Con esto se pretende disminuir los costos de instalación y el aprovechamiento de los materiales con que ya se cuenta. Además, permite que el sistema se adecue al entorno con el que la familia usualmente interactúa.

El sistema de captación de lluvia diseñado por Isla Urbana consta de 6 pasos básicos de limpieza de la lluvia, con los que se puede alcanzar una calidad óptima de agua. Hasta agosto de 2018, se han instalado más de 8,200 sistemas con estas características en todo el país, la gran mayoría en contextos urbanos y el resto en contextos rurales, impactando a más de 53,000 personas. El sistema funciona una vez que comienza a llover y el agua cae en el techo de la vivienda. El techo sirve como superficie de recepción de la lluvia. El agua se canaliza a un solo punto para bajarla al primer filtro fabricado con hojas donde se separarán los residuos sólidos que se pudieran alojar en el techo<sup>6</sup>. Posteriormente, se encuentra el Tlaloque, el cual funciona como un separador regulable de las primeras lluvias de la temporada que separa el primer volumen del aguacero, permitiendo que únicamente pase el agua limpia a la cisterna o tanque de almacenamiento. Dentro del espacio de almacenamiento se instala un reductor de turbulencias y una pichancha flotante a fin de convertir el contenedor en un sedimentador de mayor capacidad del que se extrae el agua de la superficie, que se encuentra libre de los sólidos sedimentables. Adentro de la cisterna se coloca un sistema de dosificación de cloro para asegurar la eliminación de microorganismos y materia orgánica que pudieran llegar a ingresar al tanque. El agua es extraída con una bomba centrífuga, lo que le permite tener la presión suficiente que se requiere para pasar por un tren de filtrado constituido por un filtro contra sedimentos de 50 micras y otro filtro de carbón activado.

Con un sistema como el antes descrito, la lluvia en la Ciudad de México y en el interior de la República se puede aprovechar para el uso humano; es decir, para todos los usos del hogar, excepto beber, el cual puede alcanzarse con un último paso de filtración. Es de este diseño que emanan algunas variaciones del sistema las cuales se adecúan al contexto y circunstancias específicas de la zona.

Respecto a la disponibilidad de agua, en la CDMX donde la precipitación pluvial promedio anual es de 700 mm anuales, se sugiere un almacenamiento mínimo de 2,500 litros para techos de 80 metros cuadrados en promedio. En poblaciones donde la lluvia es más escasa (por ejemplo, en San Luis Potosí la precipitación promedio es alrededor de 400 mm al año) por cada metro cuadrado se podrían captar cerca de 350 litros; es decir, con un techo promedio de 80m<sup>2</sup>, una vivienda puede tener acceso a 28,000 litros al año, aproximadamente. Con esta cantidad no se alcanzaría a cubrir el total de las necesidades de agua de una familia promedio; sin embargo, se puede dirigir sólo al consumo humano (beber y cocinar).

Al aprovechar y purificar la lluvia para su consumo se brinda a las familias una alternativa para el abasto de agua libre de la contaminación y benéfica a su salud, a comparación de la originada desde un subsuelo contaminado. Adicionalmente, las familias tienen capacidad y dominio sobre el agua que ingieren, generando así ciudadanos resilientes ante posibles contingencias y situaciones de riesgo.

Se han implementado sistemas de captación de lluvia en comunidades con fuentes de abasto contaminadas en diversas zonas del país. Por ejemplo, en la Sierra de Jalisco donde en el marco del proyecto *Ha Ta Tukari* (Agua Nuestra Vida) se han instalado más de 175 sistemas de captación de lluvia. Se ha tenido gran impacto en la vida de los beneficiarios, principalmente de mujeres e infantes<sup>7</sup>.

### La experiencia de Neta Cero

Neta Cero es un emprendimiento social y promotor de soluciones sostenibles en agua, saneamiento y energía que se dedica a la provisión de servicios básicos, mejorando la calidad de vida y aumentando la resiliencia climática en varias poblaciones en la República Mexicana. Se diseñan e implementan soluciones innovadoras de acceso y distribución de agua mediante captación pluvial a gran escala. Se han instalado más de 2300 sistemas en hogares, escuelas e instituciones, capturando aproximadamente 150 millones de litros de agua hasta la fecha.

La tecnología Neta Cero extiende el potencial de captación de lluvia de una casa a comunidades enteras utilizando techos de espacios públicos estratégicos (mercados, escuelas, canchas deportivas, auditorios municipales) y combinándolos con tanques de almacenamiento muy grandes. Adicionalmente, mediante el bombeo producido con energía solar, se inyecta el agua en redes de distribución para reducir costos e incrementar el nivel de resiliencia hídrica a los sistemas e infraestructura existentes.

En México, la cobertura nacional de agua potable es 91.6 %. Se estima que en zonas urbanas la cobertura es 95% y en zonas rurales de 78%; esto se traduce en que casi 9 millones de personas en México no cuentan con servicio de agua en sus hogares. Muchos millones más cuentan con un servicio intermitente, inadecuado y/o con una calidad no aceptable.

La última milla hace referencia al último tramo en una red de distribución de un servicio básico; por ejemplo, las conexiones a los usuarios, como es el caso de una red de agua potable. En los lugares más dispersos y alejados, el costo-beneficio es extremadamente alto debido a que la red transporta una cantidad de agua relativamente pequeña por distancias largas hacia una gran cantidad de puntos finales distribuidos de forma muy dispersa entre sí. Para resolver este desafío se deben desarrollar soluciones tecnológicas sostenibles que sean apropiadas. Una de estas soluciones

es la captación de agua de lluvia, ya que la relación costo-beneficio es accesible debido a que los “techos-manantiales” siempre se encuentran cerca de los usuarios. El enfoque de Neta Cero para dar acceso a servicios básicos -transitando la última milla- consiste en el diseño, construcción, operación y transferencia de grandes sistemas de captación de agua de lluvia con potabilización e interconexión a redes de agua potable existentes o nuevas, que producen millones de litros de agua al año, beneficiando a miles de personas con un costo accesible (<\$MXN 6 - 19 /m<sup>3</sup>). Esta innovación se puede implantar como una fuente autónoma de agua segura para poblaciones que anteriormente no tenían; o bien, como fuente complementaria de agua segura para las comunidades que tienen redes de distribución de agua existentes con un suministro y/o calidad inadecuada.



Imagen 7.2. Sistema de Captación Pluvial Neta Cero Agua y Energía con Kiosco Escolar y Planta de Purificación

### Agua de Lluvia como Fuente de Agua Segura en Zonas Contaminados con Metales Pesados

En las zonas de baja precipitación y/o áridas en México, sobre todo el norte del país, se presenta contaminación subterránea y superficial del agua, particularmente por exposición a sustancias nocivas como arsénico y fluoruro. Como se ha descrito en capítulos anteriores del presente libro, esto ha detonado problemas graves de salud en las poblaciones expuestas y se requieren soluciones de acceso y distribución de agua segura que consideren el contexto desértico y semidesértico.

Si bien es común en estas regiones áridas tener una buena cobertura del servicio de agua, la calidad no es apropiada para el consumo humano. Sin embargo, las fuentes disponibles pueden ser adecuadas para los demás usos domésticos que incluyen labores de limpieza, baños, lavado de manos y lavado de ropa.

En estrecha colaboración con CONAGUA, Neta Cero ha desarrollado y diseñado una propuesta adecuada para construir sistemas de captación de agua de lluvia en regiones que enfrentan esta problemática. Estos sistemas capturan y purifican agua de lluvia. Se dimensionaron específicamente para satisfacer el 100% de la demanda de agua potable (<1.5 L/ d) de una población determinada dejando que el agua contaminada de la red se use con seguridad para las demás necesidades del usuario (Imagen 7.2).<sup>8, 9, 10, 11 y12</sup>

## La experiencia y perspectiva de Cántaro Azul

A pesar de que existe un conocimiento popular que asegura que “el agua se está acabando”, sabemos que la cantidad de agua de hoy día es igual a la que existía hace millones de años. La mala calidad del agua por contaminación química y biológica; la inequitativa distribución y su alta demanda derivada del aumento poblacional han disminuido la disponibilidad e incrementado problemas de escasez de agua potable.

Una de las alternativas a los problemas de contaminación y escasez de agua es la captación de agua de lluvia, estrategia que aunque se ha practicado desde la antigüedad, aún no se ha desarrollado ni extendido como una práctica común en nuestra sociedad actual. Aunque en México existen regiones con diversos índices de precipitación, la captación de agua de lluvia puede funcionar en cualquier lugar, siempre y cuando se identifique claramente el alcance que tendrá y las necesidades que se buscan cubrir. Además, gracias a la adaptación de diversas tecnologías, el agua captada puede someterse a procesos de limpieza y desinfección para volverla apta para el consumo humano.

Desde la Fundación Cántaro Azul, A.C., en conjunto con otras organizaciones aliadas como Isla Urbana y Neta Cero, bajo el financiamiento de la Fundación Gonzalo Río Arronte y la aportación de Capital Sustentable, se desarrolló la herramienta disponible para todo público: “Calculadora para el aprovechamiento de agua de lluvia”<sup>13</sup> La calculadora soporta los análisis técnicos y cálculos básicos para la captación de agua de lluvia en cualquier región del país. Los cálculos permiten conocer cuánta agua se puede captar y utilizar de acuerdo a la demanda de consumo de agua, la cual varía de acuerdo al contexto donde se busque implementar (escuela, vivienda u oficina). La herramienta incluye cálculos de precipitación de acuerdo con los escenarios de cambio climático obtenidos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los sistemas de captación de agua de lluvia que la Fundación Cántaro Azul ha instalado en escuelas de las regiones rurales de Chiapas y Oaxaca (Imagen 7.3), algunas sin acceso a la red



**Imagen 7.3.** Kiosko escolar instalado en la Escuela Primaria Josefa Ortiz de Domínguez en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas

de agua entubada, proveen de agua segura para consumo a más de 15,000 niños y niñas. Están integrados de elementos pedagógicos y lúdicos dirigidos a la población infantil a fin de establecer una relación más cercana con el agua; así como, sensibilizar sobre su uso y ocuparse en la desinfección y consumo del agua captada. Gracias a la implementación de este Programa, se contribuye a mejorar la salud infantil; disminuir la desnutrición; mejorar el desempeño escolar; y evitar el alto consumo de bebidas azucaradas. Se ataca la incidencia de enfermedades gastrointestinales, desnutrición, obesidad y diabetes.

El sistema de captación de agua de lluvia también contribuye a reestructurar la relación sociedad y naturaleza, ya que conjuga la innovación tecnológica con el conocimiento natural del ciclo del agua, la importancia del consumo para la salud y la valoración sobre el cuidado del agua.

## Referencias

- <sup>1</sup> Caminos de Agua. (2018). Guía de construcción: Guía para la construcción de una cisterna de ferrocemento de 12,000 litros para captación de agua de lluvia. FGRA, El maíz más pequeño, Caminos de agua y SubCuenca Támbula Picachos. Disponible en <https://caminosdeagua.org/es/captacion-de-agua-de-lluvia>
- <sup>2</sup> Barajas Rocha C, Diek E, Kronenburg C, Krupp A, Mitchell S, Quintanilla Martinez P, Terrell D, del Villar D. (2017). Cosechando un futuro saludable, Manual para la captación, almacenamiento y tratamiento de agua de lluvia -con sistema de bajo costo- para cosechar y tomar agua segura, sana y sustentable. Semarnat, FGRA, El maíz más pequeño, Caminos de agua, Maestría en Ciencias Integrada de Cuencas y SubCuenca Támbula Picachos. 2da edición. Disponible en <https://caminosdeagua.org/es/captacion-de-agua-de-lluvia>
- <sup>3</sup> Cervantes-Gutiérrez EO, Segura El, Vázquez-Villanueva S, Falcón-Rojas A. Tecnologías apropiadas para el acceso sustentable al agua en el medio rural marginado. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2017.
- <sup>4</sup> González-Herrera A, Avilés-Flores M, Millán-Cabrera M, Fonseca-Moreno O, Ramírez-Angulo V. (2008). Estudio de Evaluación y Promoción del “tUVo” para Desinfección Casera para Consumo Humano. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008. Clave del proyecto TC-0669.2. Financiado por la Universidad de California en Berkeley.
- <sup>5</sup> Lartigue Baca C, Kegel Pacheco C, Lomnitz E y Niall N. (2016). Informe final de actividades: Análisis de la calidad del agua en sistemas de captación de agua de lluvia, Isla Urbana, UNAM y Pumagua. 29 de diciembre de 2016. [http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2017/06/VF\\_Informe\\_de\\_actividades\\_Isla\\_Urbana\\_PUMAGUA.pdf](http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2017/06/VF_Informe_de_actividades_Isla_Urbana_PUMAGUA.pdf)
- <sup>6</sup> Moreno Fonseca, Omar. “Captación de agua de lluvia para comunidades rurales”, Documentos de Isla Urbana, [http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2017/06/captacion\\_de\\_agua\\_de\\_lluvia.pdf](http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2017/06/captacion_de_agua_de_lluvia.pdf)
- <sup>7</sup> Salinas Hernández, Adriana Guadalupe. (2015). “Impacto ambiental, social y económico derivado de la implementación de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia en dos estudios de caso en México”, Tesis. Licenciatura en Ciencias Ambientales, UNAM.
- <sup>8</sup> Adams J, Jamie Bartram, Yves Chartier, and Jackie Sims. (2010). “Normas Sobre Agua, Saneamiento E Higiene Para Escuelas En Contextos de Escasos Recursos.”, Organización Mundial de la Salud, páginas: 64, ISBN: 978-92-4-354779-4.
- <sup>9</sup> Organización Panamericana de la Salud. (1997). Municipios Saludables. Comunicación para la Salud, 42. <http://pesquisa.bvsalud.org/bvsmis/resource/pt/mis-6091>
- <sup>10</sup> Ordóñez G. (2000). “Salud Ambiental: Conceptos Y Actividades.” Revista Panamericana de Salud Pública 7 (3): 137–47. doi:10.1590/S1020-49892000000300001.
- <sup>11</sup> Programa Nacional de Siembra y Cosecha de Agua. (2017). “Rumbo a Un Aportes Y Reflexiones Desde La Práctica.” Accessed August 4. <http://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/p-agraria/libro-siembra-cosecha.pdf>.
- <sup>12</sup> Hernández M & Hernández-Martínez, F. (2008). Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso. GEM, TIES Cuencas Sanas y Modos de Vida Sustentable Series de Manuales de Capacitación. Disponible en el sitio: [http://licenciatura.iconos.edu.mx/k\\_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20agua%20de%20lluvia.pdf](http://licenciatura.iconos.edu.mx/k_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20agua%20de%20lluvia.pdf).
- <sup>13</sup> Calculadora para el aprovechamiento del agua de lluvia. Disponible en el sitio <http://lluvia.cantaroazul.org/>

## EDUCACIÓN Y COMUNICACIÓN AMBIENTAL

María Teresa Gutiérrez, Alejandra Fonseca, Mauricio  
León Arce, Juan Manuel Casanueva y Gibrán Mena

El diseño e implementación de estrategias de comunicación y educación ambiental poseen un poder transformador cuando son pertinentes y se aplican adecuadamente.

El rezago educativo en México ha incidido negativamente en la manera en cómo suele plantearse el tema de agua. Generalmente, sólo se abordan cuestiones científicas ligadas a las propiedades del agua y sus efectos en el medio físico como en el ciclo del agua. Sin embargo, este ciclo es incompleto si desconocemos su gestión y de dónde proviene el agua.

Se considera que el tema del agua debe contextualizarse en su gestión bajo una perspectiva de cuenca, derechos humanos, aspectos legales y responsabilidades que tenemos como ciudadanos para conocer, valorar y mejorar la calidad de agua.

Por un lado, la educación ambiental puede construir competencias y responsabilidad cívica para que aprendamos sobre nuestro rol ciudadano en la gestión y el saneamiento del agua, en particular, el monitoreo y la evaluación de la calidad del agua que consumimos. La educación no se restringe a la educación básica; no obstante, debiera comenzar a edad temprana.

Por otro lado, los medios de comunicación, las Tecnologías de la Información, Comunicación y Conocimiento (TICC), las redes sociales y la proliferación de dispositivos móviles facilitan la gestión y difusión de la información que puede aprovecharse en el contexto de la gestión del agua. La sociedad del conocimiento y el surgimiento de ciberculturas permiten el uso intensivo de las TICC a través de plataformas como las redes sociales, aplicaciones y nuevos patrones de comunicación compatibles con la Economía colaborativa, la Gobernanza participativa y Democratización del conocimiento.

### Comunicación y educación para la participación ciudadana

Con el fin de promover la participación ciudadana informada y basada en procesos de gobernanza del agua, y con el aprovechamiento de las TICC, el Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. A.C. (FCEA), opera el “Portal del Agua” desde 2004<sup>1</sup> y más recientemente una plataforma y aplicación para iOS y posteriormente para Android “Nuestra Agua”. El Portal publica objetos de conocimiento de carácter general y la App “Nuestra Agua” información para cuencas y puntos específicos. El portal y la App son promovidos en redes sociales y medios convencionales para posicionarlos como referentes en materia de agua en México.

El “Portal del Agua” es un sitio de referencia en México y América Latina para la consulta de materiales acerca del agua. Este espacio digital gestiona información, realiza catalogación, resúmenes y relaciona con otros objetos de conocimiento para contextualizar y brindar mayor significado a los contenidos. La experiencia operativa del “Portal del Agua” ha permitido al FCEA conocer las necesidades de la ciudadanía y las organizaciones en torno al tema del agua.

La plataforma y aplicación “Nuestra Agua” persigue contribuir a una mejor comprensión del agua en México a través de información georreferenciada por cuenca, con base en la delimitación de las 393 cuencas del país. Su objetivo es contribuir a la gestión del conocimiento sobre el agua en México y fomentar la participación informada de los actores locales para que el conocimiento adquiera un

nuevo significado, sea relevante y genere un sentido de pertenencia y corresponsabilidad en el manejo del agua entre sus habitantes.

### Primer mapa colectivo de cuencas hidrográficas de México

La plataforma y la aplicación son herramientas de construcción colectiva de actores clave en cada cuenca (organizaciones de la sociedad civil, asociaciones gremiales, usuarios, autoridades, ciudadanos y académicos) que aportan información relevante para crear el primer mapa colectivo de cuencas hidrográficas del país. “Nuestra agua” fortalece una visión territorial basada en el manejo integral de cuencas; propicia la discusión a nivel local; fortalece el sentido de pertenencia y corresponsabilidad en el manejo del agua entre sus pobladores; y facilita la difusión de información clave para la salud.

Al contar con una amplia gama de colaboradores, “Nuestra Agua” tiene un contenido plural que permite contrastar y comparar datos, revisar diversos enfoques y propuestas, facilitar la construcción de redes, el diálogo y el intercambio de experiencias entre los usuarios y dar un nuevo significado a los contenidos publicados. Nuestra Agua, está diseñada para poner al alcance de la ciudadanía los datos sobre calidad el agua en México, necesarios para exigir su derecho al agua potable y al saneamiento.

La información publicada en la App puede ser consultada por los usuarios que la visiten. Esto hace de la App una herramienta didáctica para contribuir a identificar los aspectos locales que influyen en la gestión integral y sustentable del agua en su cuenca. El desarrollo, funcionamiento y promoción de esta aplicación, desarrollada *a la medida*, representa una solución informática para la publicación de información a nivel de cuenca, a partir de siete preguntas básicas: ¿De dónde viene el agua que usas? ¿A dónde va el agua que usas? ¿Cuánta hay y en qué se usa? ¿Quiénes son los actores clave de tu cuenca? ¿Cuáles son los problemas y riesgos de tu cuenca? ¿Cuáles son las propuestas y alternativas para tu cuenca? ¿Cuál es la calidad del agua en mi cuenca?

### Recomendaciones para influenciar efectivamente a audiencias

Los patrones de comunicación se hacen cada vez más complejos a medida que Internet amplía su base de usuarios y las nuevas tecnologías son utilizadas por más personas. Bajo una perspectiva infoactivista<sup>1</sup>, la comunicación se centra en identificar los medios o espacios comunicativos en los que interactúan audiencias específicas para enviarles contenido e interactuar con objetivos. La Guía de Infoactivismo<sup>3</sup> identifica etapas para planear la comunicación y construir tácticas que impacten en las poblaciones clave; así como, para atender y evaluar el impacto de cambio (Figura 7.1).



Figura 7.1. Etapas del Proceso de Infoactivismo.

Uno de los principales retos en la planeación es identificar los medios y espacios de comunicación (físico o digitales o híbridos) en contacto con las audiencias clave; posteriormente, se podrán diseñar y disseminar los contenidos educativos en el formato de comunicación acorde con la audiencia meta.

Entonces, las metodologías infoactivistas ayudan a identificar los medios *ad hoc* para comunicarse e interactuar con las audiencias involucradas en la problemática de calidad de agua; por ejemplo, con los gobernantes locales, los líderes comunitarios, los filántropos y la población afectada por contaminación del agua con fluoruro y arsénico.

### ¿Cómo potenciar narraciones basadas en datos sobre calidad de agua?

Las organizaciones y especialistas vinculados a la calidad de agua tienen acceso directo a los datos derivados de mediciones científicas de elementos contaminantes del agua, tales como el fluoruro y el arsénico; asimismo, a los testimonios de voz de las poblaciones afectadas. Datos y testimonios son elementos muy poderosos para la comunicación e incidencia para mitigar la contaminación del agua. El reto infoactivista es comunicar los datos de manera impactante, de tal forma que las audiencias dimensionen la problemática vinculando las cifras a un contexto social y humano. Los testimonios transmiten a través de su imagen, expresiones e historias aquello que las personas afectadas atraviesan y sufren. Sin embargo, audiencias no-sensibilizadas con la problemática requieren comprender el problema, identificar sus causas y efectos; así como, sus consecuencias con tal de poderse sensibilizar del todo.

El reto de comunicar adecuadamente se incrementa cuando se tienen objetivos distintos, tales como posicionar o sensibilizar; por lo que, se requiere contemplar una visión secuencial (*evolutiva*) que pueda influenciar a la audiencia para aumentar su información e involucramiento con la causa. La teoría de la '*visualización para la incidencia*' ha identificado tres sencillos pasos para que audiencias nuevas comprendan la problemática; y las audiencias involucradas percatan detalles. En la Figura 7.2 se presentan tres objetivos de comunicación (exponer, explicar y explorar) para plasmar los formatos más efectivos para comunicar para la incidencia. Consulte el "Manual de Visualización para la Incidencia" en dónde encontrará más ejemplos y detalles teóricos<sup>4</sup>.

### Las plataformas de redes sociales como herramientas de divulgación y comunicación de contenidos científicos.

Con la llegada de la era digital, la sociedad se ha enfrentado a retos relacionados con la conectividad y la globalización. El espacio digital ha influido en la vida cotidiana, de tal forma que los procesos en que las personas se relacionan, intercambian y comparten información han protagonizado la construcción de lazos culturales, políticos y sociales a nivel mundial<sup>5</sup>. Las redes sociales son plataformas de Internet que facilitan la interacción entre personas y grupos para establecer relaciones e intercambiar información, experiencias e intereses. Las redes sociales conforman relaciones multidireccionales entre dos o más personas pertenecientes a la misma red; a diferencia del flujo de información unidireccional<sup>6</sup> de los medios masivos de comunicación.

|                     | UTILIZADO PARA... | FUNCIONA AL...       | FORMATOS COMUNES...  |
|---------------------|-------------------|----------------------|--|
| ENTENDER LA IDEA    | Exponer           | Evocar reacciones    | Gráficos simples e imágenes, posters, infografías simples                      |
| ENTENDER LA IMAGEN  | Explicar          | Contar historias     | Infografías, animaciones, mapas  |
| ENTENDER EL DETALLE | Explorar          | Construir recorridos | Bases de datos dinámicas y visualizaciones complejas, infografías interactivas |

Figura 7.2. Resumen de Enfoques y Técnicas de Visualización para la Incidencia

En una red social, cada elemento es independiente e influyente en las conexiones que se dan entre internautas. Es interesante percibir a las plataformas de redes sociales como herramientas de divulgación científica eficientes cuando se hace referencia al intercambio de saberes; debido a que no se hablaría únicamente de una exposición de la información, sino también a la capacidad de intercambiar ideas, experiencias, inquietudes y conocimientos sobre el contenido científico que se expone. Las redes sociales no son explícitamente sitios para plantear cuestiones científicas y esperar la respuesta de especialistas<sup>2</sup>; sin embargo, promueven la participación de todo tipo de personas en un debate abierto y accesible para la población usuaria de la red.

La divulgación científica a través de redes sociales consiste en extender los conocimientos científicos a la mayor parte de personas, volviéndolos partícipes del intercambio de información. En este sentido, consta de un proceso que radica en extender los conocimientos científicos a una mayor cantidad de personas, haciéndolos partícipes de un intercambio de información, conocimientos, datos, experiencias e ideas. Estos sitios no son exclusivamente utilizados para plantear cuestiones científicas y esperar la respuesta de especialistas; ahora bien, abre espacios de debate accesibles para todo tipo de usuarios y expande el diálogo científico. Así, las redes sociales se consolidan como estrategias útiles para la divulgación y promoción de contenido especializado.

Según datos de la Asociación Mexicana de Internet (AMIPCI)<sup>7</sup>, en México se registraron 79.1 millones de internautas a finales de 2017, de los cuales el 89% es acaparado por las redes sociales, lo cual representa un área de oportunidad importante para la comunicación y divulgación científica orientada a prevenir la exposición a contaminantes. En este punto, resulta indispensable considerar los retos que enfrentan el Internet y las redes sociales en relación a la divulgación científica. Por un lado, la difusión de contenido falso o *fake news* que se vuelven virales por acción de internautas que no se dan a la tarea de revisar la procedencia de dicha información, lo cual puede llegar a generar una ignorancia colectiva entre grupos. Por otro lado, la garantía del derecho a la libertad de expresión y acceso a la información, ya que no se encuentra tan definido en la sociedad *online*

como en el espacio *offline*. Es decir, que el acceso a la información a través de herramientas digitales se limita a sectores sociales que cuentan con el poder adquisitivo e infraestructura necesarios para utilizar dichas herramientas.

En consecuencia, la falta de acceso a la información *online* es un reflejo de las situaciones que se dan *offline*, pero sin limitaciones y/o fronteras. La falta de acceso a información de calidad, especializada y enfocada a la prevención de exposición a contaminantes y protección de la salud a través de medio digitales, no sólo reflejan la situación *offline*, si no también, representan un obstáculo para reconocer, garantizar y proteger el derecho humano a la salud y a un ambiente limpio y sano.

## Observaciones finales

María Teresa Gutiérrez brinda la siguiente reflexión: *“Una sociedad que reconoce los valores múltiples del agua y es sensible a los problemas ambientales asociados a su uso; que es capaz de identificar los principales retos planteados para que ésta sea usada de una forma más sostenible; que adopta comportamientos responsables en su relación con el agua y que apoya las iniciativas colectivas orientadas a hacer un buen uso de los recursos hídricos, es la mejor garantía de la utilización racional del agua.”* El nuevo modelo de gobernanza ambiental, basado en la deliberación y la cooperación, es hoy el único camino para gozar del derecho a un medio ambiente sano y conseguir un verdadero desarrollo sostenible. Las escuelas hoy tienen el deber de formar ciudadanos capaces de tomar de decisiones a partir del conocimiento de sus derechos y obligaciones en materia ambiental, para promover acciones individuales y comunitarias, y, a su vez la incidencia en políticas públicas a favor de la sostenibilidad fundamentada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

En el marco de la colaboración con la Comisión de Hábitat, Medio Ambiente y Sostenibilidad (CHMAS), el FCEA ha incluido en Nuestra agua la sección de “Calidad del agua”, donde se han publicado para consulta libre los datos del Inventario Nacional de Calidad de Agua (INCA), entre otros, con la finalidad de poner a disposición de la ciudadanía información sobre la calidad del agua y los actores clave en las distintas cuencas del país.

## Referencias

- <sup>1</sup> Sitio del Portal del Agua <https://www.agua.org.mx>
- <sup>2</sup> Definición comúnmente aceptada ([https://en.wikipedia.org/wiki/Information\\_activism](https://en.wikipedia.org/wiki/Information_activism)), interpretaciones por parte de Tactical Technology Collective (<https://howto.informationactivism.org/>) y SocialTIC (<https://infoactivismo.org/que-es/>).
- <sup>3</sup> Consultar y descargar la Guía de Infoactivismo en [https://socialtic.org/guias/GuiaIA\\_Digital.pdf](https://socialtic.org/guias/GuiaIA_Digital.pdf)
- <sup>4</sup> “Manual de Visualización para la Incidencia” <https://infoactivismo.org/manual-visualizar-informacion-para-la-incidencia/>
- <sup>5</sup> Quiñónez H, Guerrero I, Yarhumy R. Estrategia comunicacional para la difusión y divulgación de grupos de investigación. Caso: Universidad de los Andes (Táchira-Venezuela), Razón y palabra, 87 (2014).
- <sup>6</sup> Islas O, Ricaurte P. Investigar las redes sociales. Comunicación total en la sociedad de la ubicuidad. ISBN 978-607-00-7126-3. Tecnológico de Monterrey: Ciudad de México (2013).
- <sup>7</sup> Asociación Mexicana de Internet (AMIPCI). 14° Estudio sobre los Hábitos de los Usuarios de Internet en México 2018. Estadística digital. (2018).

## RESTAURACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS: LA EXPERIENCIA EN LA SUBCUENCA ALTA DEL RÍO DE LA LAJA, GUANAJUATO

Agustín Madrigal Bulnes y Gerardo Ruiz Smith

Las acciones de restauración en ecosistemas persiguen recuperar las características propicias y favorables para desarrollar vegetación en los suelos a partir de los nutrientes que existen en ellos. El mejorar las condiciones del suelo y aumentar el porcentaje de materia orgánica y cobertura permite regular el ciclo del agua; ya que se reduce la erosión, escorrentía y se mejora la infiltración de agua al subsuelo. El incrementar la infiltración de agua de lluvia a los suelos aumenta la recarga de los mantos freáticos y –potencialmente– disminuye la concentración de contaminantes como el fluoruro y el arsénico en las aguas subterráneas.

Un suelo sometido por años al sobrepastoreo (de cualquier tipo de ganado) se agota y compacta progresivamente; pierde su capacidad de infiltración de agua y de renovación de sus nutrientes. De igual forma, un suelo sometido a métodos intensivos de labranza o quemas pierde gradualmente sus propiedades originales y necesita renovarse.

El proceso de renovación inicia al retirar el ganado y cercar con alambre de púas o malla, de tal forma que el ganado deje de asistir al sitio. Esto es necesario para que el suelo descansa y siga un proceso de recuperación. En algunos contextos, el uso de sistemas de pastoreo planificado con una perspectiva holística puede ayudar en la restauración de los suelos si es llevado a cabo de manera correcta. Posterior a ello, hay que observar las condiciones del sitio dentro del ecosistema donde se hará la intervención.

Los suelos y paisajes son diversos y se comportan de manera diferente a las condiciones del clima que predomina durante las diferentes estaciones del año. Si se observa el suelo en secas y se le compara con lo que sucede en tiempo de lluvias se podrá entender mejor cómo se comportan los escurrimientos; cuáles son las áreas de mayor insolación; dónde se empiezan a desarrollar los pastos; si hay presencia de arbustos y de árboles; si es pedregoso; si hay presencia de rocas sueltas y demás.

Lo importante es observar las condiciones del clima, y a partir de ello, llevar a cabo acciones acordes a las necesidades específicas. Es importante utilizar los materiales existentes de cada área dentro del sitio en el que se pretenden llevar a cabo las acciones de restauración. Además, considerar la forma del terreno o topografía del lugar para llevar a cabo las acciones de restauración. Por ejemplo, una intervención en una zona de lomeríos será distinta a espacios con planicies. La acción del clima en zonas de lomeríos suaves se comporta diferente a zonas de lomeríos con mayor grado en la pendiente.

Destaca el considerar las características inherentes a cada ecosistema, y el grado de impacto en los mismos; ya que los factores a considerar se incrementan. Por ejemplo, la vegetación existente brinda información sobre las condiciones climáticas y del suelo. Si llueve poco y se trata de un ecosistema semidesértico se tendrá una representación de especies como los mezquites y los huizaches. Si se está a mayor altura y el clima es más fresco, seguramente el paisaje corresponde a un ecosistema de bosque templado, representado por encinos y pinos. De igual forma, tendremos áreas que estén en el medio de ambas y a esas se les conoce como *zonas de transición de vegetación*.

Después de observar el sitio se debe cercar; conocer las condiciones y elementos del paisaje; identificar la vegetación existente; e iniciar el proceso de restauración. La restauración dependerá de las condiciones topográficas y los materiales existentes en el terreno.

### Barreras para detener la erosión

Una de las principales causas del deterioro del suelo es la erosión por falta de vegetación, arrastre durante las lluvias o la falta de elementos que ayuden a detenerla. De ahí que, la observación de las condiciones resulta vital. Por ejemplo, detener la erosión en zonas con conjuntos de montañas de poca altura conocida como *lomeríos*. Ante lomeríos con suelos muy impactados, laderas con pendientes y rocas sueltas disponibles se pueden construir barreras de piedra acomodada a curvas de nivel (Imagen 7.4).



Imagen 7.4. Terraceo en ladera en la Subcuenca Alta del Río Laja

La construcción de las *barreras* se facilita con la presencia de rocas sueltas, las cuales son acomodadas a una altura de 30 cm por 30 cm de ancho aproximadamente (Ver Imagen 7.4). Se conforma una *barrera* que detendrá los suelos acarreados por los escurrimientos de agua de las partes altas hacia las partes bajas. La función de las *barreras* es frenar la erosión y crear zonas de infiltración que propicien mayor humedad. Además, en los espacios contenidos por las barreras se puedan depositar semillas a través del acarreo de sedimentos; y contribuir al desarrollo de nutrientes que servirán al crecimiento de pastos conformando un manto protector del suelo, y el desarrollo progresivo de arbustos y arbolado nativos.

Si estas *barreras* son trazadas con distancias entre una y otra de 20 m, por ejemplo, se irán conformando barreras escalonadas que irán cerrando el paso de los sedimentos acarreados. Las distancias entre las barreras podrían variar dependiendo del área total y de las condiciones topográficas. Es importante mencionar que cada sitio tendrá condiciones particulares las cuales

deberán de ser observadas, analizadas y en función de lo cual se tomará la determinación de que podrá ser lo más conveniente.

El ejemplo de restaurar con barreras de piedra acomodada representa una alternativa, de entre varias, que se han venido desarrollando por parte de los diferentes programas de gobierno o bien parte de organizaciones ambientalistas de la sociedad civil que tienen un trabajo de base con las comunidades rurales de diversos ecosistemas del país.

### Reforestación para detener la erosión

Las barreras de piedra acomodada pueden ser complementadas con la *reforestación*, en los espacios intermedios de barrera a barrera, con especies características de la región en la que se trabaje. Podrían ser huizaches, mezquites e incluso nopal o maguey si las condiciones climáticas son las propicias para un ecosistema de semi-desierto. O bien, pueden ser especies de encino, pino u oyamel cuando se trata de predios en ecosistemas boscosos (Imagen 7.5). Algunas de las especies de árboles, cactáceas y agaváceas apropiadas para este tipo de proyecto pueden ser integradas y manejadas como fuente de alimento, forraje, leña, materiales de construcción, etc. Estos productos pueden representar una fuente de recursos e ingresos para las comunidades.



Imagen 7.5. Reforestación con Mezquite

### Opciones de obras para conservar el suelo

Se propicia la restauración y conservación de un suelo sano a partir de múltiples acciones, tales como: las zanjas bordo; las zanjas-trinchera; las terrazas; las barreras vivas y las enramadas (Imágenes 7.6 A y B). Estas formas de restauración cumplen objetivos específicos y su elección dependerá de los aspectos mencionados anteriormente como la topografía, el clima, la vegetación existente y las características propias de cada ecosistema. Se recomienda complementar estas acciones con la reforestación de especies nativas del sitio restaurado para completar el proceso de restauración.



Imágenes 7.6 A y B. Construcción de Terrazas de piedra acomodada y Terraza Concluida.

### La aforestación para detener la erosión y encauzar los ríos

Las acciones de *aforestación* se llevarán a cabo en sitios sin presencia de vegetación original conocida. La *aforestación* deberá de ser bien planeada dados los impactos que pueden generar dentro del entorno del ecosistema a restaurar. Es decir, los plantaciones de esta naturaleza deberán considerar especies lo más semejantes a las proximidades del sitio y adaptables a las condiciones climáticas predominantes. Por supuesto, durante todo el proceso de restauración (planeación a intervención), deberán ser considerados prioritariamente los habitantes de las comunidades rurales y campesinas; ya que, serán ellos quienes llevarán a cabo los trabajos y quienes tendrán bajo su cuidado y responsabilidad el seguimiento y el monitoreo de los sitios intervenidos por los años venideros.

### Experiencia en la Subcuenca Alta del Río de la Laja, Guanajuato

El desarrollo de acciones de restauración y conservación en la Subcuenca Alta del Río de la Laja se remonta a más de 20 años. La región se ubica en la zona norte-noreste del estado de Guanajuato, en el centro de México. Los trabajos se han llevado a cabo de manera conjunta y previamente convenida con el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América para la restauración de ríos y arroyos. Los cauces originales se habían perdido debido a las extracciones ilegales de arena.

Las obras principales realizadas en los ríos y arroyos fueron presas de piedra y deflectores que pretendían devolver el cauce original al utilizar las rocas que se encontraban en los lechos de los mismos ríos y arroyos (Imagen 7.7). En paralelo, se intervenía la ribera de los ríos al reforestar con especies nativas como los álamos, los alisos y los sauces, cuya función prioritaria es estabilizar y fortalecer las zonas de ribera al reencauzar el río.



Imagen 7.7. Represas de piedra acomodada en arroyos.

Posterior a estas acciones en los ríos, se completan los trabajos en las laderas de los lomeríos circundantes con otras opciones de obras para fortalecer el suelo (barreras de piedra acomodada, zanjas, enramadas y demás trabajos dependiendo de cada caso). Estas acciones en las laderas contribuyen a limitar el aporte de sedimentos a los arroyos y ríos, los cuales desembocan en bordos, en pequeñas represas y al final del trayecto en la Presa Ignacio Allende. Es decir, con estas acciones se contribuye a limitar el azolvamiento de los cuerpos de agua locales.

### Casos de fluoruro y arsénico en los pozos

Al paso de los últimos 20 años trabajando en la región y con los resultados de los estudios llevados a cabo en el acuífero subyacente a la Subcuenca Alta del Río Laja, se empezó a contar con más datos de los contaminantes en los pozos, principalmente del fluoruro y del arsénico, si bien era algo ya conocido por la gran problemática de casos de fluorosis dental de la región, la magnitud todavía no era reconocida.

Dada la magnitud del problema de los contaminantes de los pozos y considerando los trabajos de restauración y conservación llevados a cabo por años en múltiples comunidades que fueron identificadas con el problema, se consideró que la identificación de las fuentes de agua activas y pasivas, en las comunidades tomarían un lugar relevante en el diseño de estrategias alternativas para el consumo de agua de calidad en las comunidades expuestas a concentraciones altas de fluoruro y arsénico.

Al identificar en la comunidad las fuentes de agua de calidad como manantiales y veneros de donde los habitantes años atrás consumían el agua para beber y a través de monitoreo en campo complementados con testimonios de los habitantes, se identificó que en algunos sitios, se daba una relación estrecha entre la renovación de manantiales y veneros (que se habían ido desecado con el paso del tiempo), con las acciones de restauración que propiciaban infiltración y por tanto una renovación de estos (Imagen 7.8).

Este hecho motivó a darle un sentido mayor a las acciones de restauración que propician infiltración de agua a estratos sub-superficiales, la cual se traduce en el resurgimiento de manantiales y veneros que tienen agua de calidad y que benefician tanto a la vida silvestre como a los habitantes de algunas comunidades donde ya no beberán agua de los pozos contaminados.



**Imagen 7.8.** Construcción de zanjas con reforzamiento de piedra para propiciar infiltración

## Observaciones finales

Es importante mencionar que estos son casos aislados comparados con el número de comunidades que tienen este serio problema, estas acciones idealmente deberán de ser desarrolladas de la mano de la instalación de sistemas de cosecha de agua de lluvia y de la construcción de ollas de agua, como las construidas en la región por la Comisión Nacional de Zonas Áridas, representando en su conjunto alternativas viables que evitarán que los habitantes de estas comunidades continúen consumiendo agua de pozos contaminados. Todo este proceso, ha sido y deberá seguir desarrollándose con un acompañamiento de procesos de participación comunitaria, capacitación campesina y educación ambiental en los diferentes niveles escolares de las comunidades rurales y campesinas.

## Lecturas sugeridas

- SEMARNAT (2014). “Ríos Libres y vivos, Introducción al caudal ecológico y reservas de agua” Con el apoyo de la Alianza Fundación Gonzalo Río Arronte y la Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- CONAFOR (2014) “Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales (Manual de Obras Prácticas)”.
- SEMARNAT (2015) “Suelos, Bases para su Manejo y Conservación” Con el apoyo de la Alianza FIRA, Fundación Gonzalo Río Arronte y la Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- SEMARNAT (2013) “Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y Perspectivas para su Manejo y Gestión” Con el Apoyo de la Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.

## DATOS ABIERTOS E INICIATIVAS

Mónica Nayeli Velasco-Estudillo, Octavio Aguirre, Juan Manuel Casanueva y Claudia Coronel Enriquez

### Gobierno Abierto, Transparente, Sostenible e Incluyente en la Sociedad del Conocimiento

Se considera que en la sociedad del conocimiento, el Gobierno-Estado requiere establecer canales de comunicación bilaterales, e iniciativas integrales, ordenadas y medibles que permitan resultados visibles por terceros. Simultáneamente, diseñar e implementar nuevos mecanismos de interacción con la ciudadanía tal que faciliten: a) co-crear soluciones sostenibles e incluyentes a las necesidades específicas de la población; b) exhortar nuevas formas de gobernar y ejercer la democracia; c) integrar la participación activa y la corresponsabilidad ciudadana en las decisiones, la implementación y el seguimiento de las iniciativas.

A esta nueva forma de gobernanza se le conoce como Gobierno Abierto, el cual se caracteriza por ser transparente, rendir cuentas y emplear intensivamente las Tecnologías de Información, Comunicación y Conocimiento (TICC). A nivel internacional, la Alianza para el Gobierno Abierto (OGP por sus siglas en inglés) y sus respectivas implementaciones nacionales en los *Planes de Acción* conforman el mejor esfuerzo por *institucionalizar* esta nueva manera de gobernar<sup>1</sup>. México se incorporó a esta iniciativa en 2015 por medio de un decreto presidencial<sup>2</sup>.

¿Cómo brinda transparencia, sostenibilidad e inclusión la gobernanza del Gobierno Abierto? Se contempla que la transparencia proviene de facilitar el acceso gratuito a la información pública mediante las TICC, el uso de canales de comunicación *gobierno-sociedad* transversales –como el Secretariado Técnico Tripartita- y bien establecidos tales como las *consultas públicas* y las *jornadas abiertas*. La *transparencia* ha transitado por un largo camino, y entre los aprendizajes ahora se sabe que no basta con abrir los datos y documentos públicos a solicitud del ciudadano. Estos datos y documentos deben ser comprensibles, reutilizables y accesibles de manera incluyente. De ahí, que la iniciativa de gobierno abierto considera estándares de datos abiertos comparables a nivel internacional por campo de conocimiento (movilidad, educación, salud, etc.) y una guía de implementación<sup>3</sup>.

Con relación a la *sostenibilidad*, la iniciativa internacional *Agenda 2030* marca la pauta con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); que en el caso de México se incluyeron en el Plan de Acción Nacional, lo cual ha permitido priorizarlos y contextualizarlos en las estrategias de implantación<sup>4</sup>. Las políticas *incluyentes* y los mecanismos de inclusión provienen de la interacción y el diálogo abierto entre el gobierno, el sector empresarial, la academia y el tercer sector en problemáticas y territorios específicos.

El resultado de los mecanismos de comunicación entre gobierno y academia fue definir la *Gobernanza de recursos naturales y cambio climático* como eje temático del Plan de Acción, en el cual se identificaron dos temas de acción: la obesidad en niños y adolescentes, y la calidad de los servicios de agua, mismos que se abarcaron en mesas de trabajo independientes. Se recomienda leer el Plan de Acción 2016-2018 de México donde se desarrolla el eje temático problema público de *Acceso al agua potable*; y los resultados de las Jornadas Abiertas sobre las *Carencias y deficiencias en el acceso de agua potable*, su árbol de causas y consecuencias<sup>5</sup>. En el texto, se describen los resultados de las mesas de trabajo desde las reflexiones iniciales, el desarrollo y discusión, la identificación temporal, los compromisos y el trazo de metas en horizonte temporal 2030.

## Significado, implicaciones y casos emblemáticos de Datos Abiertos

Según la Carta Internacional de Datos Abiertos, “Los datos abiertos son datos digitales que son puestos a disposición con las características técnicas y jurídicas necesarias para que puedan ser usados, reutilizados y redistribuidos libremente por cualquier persona, en cualquier momento y en cualquier lugar”<sup>6</sup>. Los primeros cuatro principios de la Carta definen las características que los datos, y las políticas que los promueven, deben presentar para ser considerados abiertos:

1. *Abiertos por Defecto*
2. *Oportunos y Exhaustivos*: Los datos serán exhaustivos y precisos, y liberados de acuerdo con la priorización informada por consultas a los usuarios. En la medida de lo posible liberar datos: a) originales, sin modificaciones, y vincular los datos a lineamientos, documentación, visualizaciones o análisis relevantes (metadata); y b) desagregados hasta los niveles más bajos de la administración.
3. *Accesibles y Utilizables*: diversos usuarios pueden encontrar, acceder y utilizar los datos. Esto implicará proporcionar los datos en múltiples formatos estandarizados (computadoras y personas). Es necesario liberar los datos: a) de manera gratuita, sujetos a una licencia abierta y sin restricciones; y b) sin registro obligatorio, permitiendo a los usuarios escoger descargar los datos sin requerir que se identifiquen.
4. *Comparables e Interoperables*: los estándares abiertos se implementan de manera consistente al recolectar y publicar los datos. Es indispensable asegurar que los conjuntos de datos abiertos incluyen metadatos consistentes y sean disponibles en formatos legibles para humanos y máquinas. Bajo un plano técnico, se utilizan los parámetros de las 5 Estrellas de Tim Berners Lee para identificar los distintos niveles de aperturas en los datos. El diagrama identifica el formato y características de cada uno de los niveles (Figura 7.3).

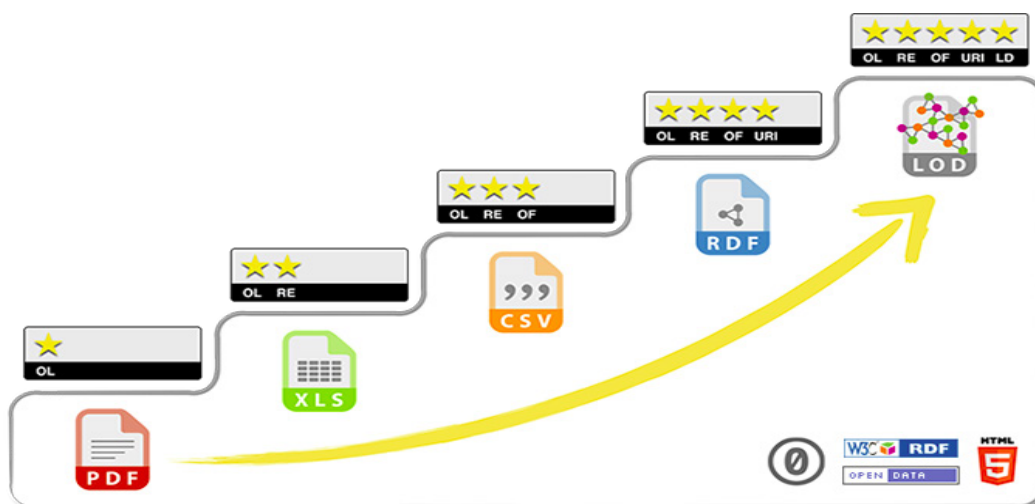


Figura 7.3. Modelo de las 5 Estrellas de la Apertura de Datos<sup>7</sup>.

Los datos gubernamentales por naturaleza de financiamiento, origen y propósito son datos públicos. Deben estar disponibles y ser accesibles y utilizables de forma libre, abierta y gratuita a la ciudadanía a través de interfaces digitales. No obstante, procesar los metadatos para abrirlos tiene implicaciones importantes de esfuerzo, costo, cultura y voluntad política; los cuales, es preciso identificar y comparar con su potencial para establecer expectativas realistas tanto de su apertura como de su uso<sup>8</sup>. En la categoría de calidad de agua (incluyendo los parámetros de arsénico y

fluoruro), México califica como 0% abierto en estándares internacionales debido a que “no es transparente, actualizada, abierta, disponible al público y gratuita”<sup>8</sup>.

La información gubernamental se clasifica según los costos que implica convertirla en datos abiertos. La viva es la más viable porque ya está digitalizada, lista para ser refinada y accesible al público si hay voluntad política; mientras que la inerte es costosa debido a su formato de origen (Figura 7.4).

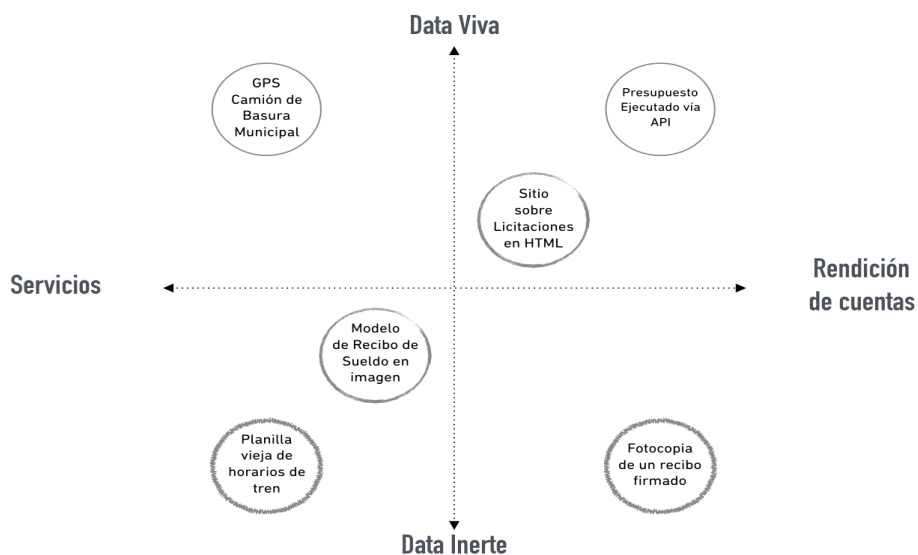


Figura 7.4. Clasificación de la información gubernamental

El *potencial de impacto* de los datos abiertos depende del uso que le da el usuario (intermediario o final) en las actividades propias del sector y la causa. Por ejemplo, desde gobierno se espera que los datos abiertos deben ser consumidos internamente para generar análisis intersectoriales especializados que sustenten la creación, implementación y seguimiento de política pública efectiva. En el sector académico y periodístico, los datos abiertos son un insumo fundamental para realizar análisis y basar estudios, reportajes y narrativas. En la sociedad civil, los datos abiertos sirven para ejercer la rendición de cuentas, analizar contextos sociales y generar acciones educativas, comunicativas y de incidencia.

Si bien el Gobierno Abierto pretende dar acceso libre y gratuito de los datos e información pública por razones de legitimidad y buena gobernanza; las plataformas digitales permiten el uso, generación y explotación de información en contacto con la ciudadanía y otros sectores de la población a manera de *crowdsourcing*. La democratización de la información se integra a la dinámica de la economía colaborativa y de conocimiento al volvernos partícipes en la cocreación y explotación de datos información y conocimiento. A continuación, citamos ejemplos de proyectos emblemáticos en el uso de datos abiertos de calidad ambiental.

- ▶ Swim Guide: medición y socialización de niveles de calidad de agua en espacios para la recreación acuática, tales como ríos, lagos y mares en Canadá<sup>9</sup>.
- ▶ Visaguas: proyecto periodístico basado en datos de calidad del agua que mide los niveles de abastecimiento, contaminantes y acceso al agua en Brasil<sup>10</sup>.
- ▶ Qué Pasa Riachuelo: medición y socialización de las mediciones de contaminantes de las industrias de la cuenca de La Plata en Argentina<sup>11</sup>.

- GapMaps: Proyecto para visibilizar la calidad de agua a nivel mundial por medio del mapeo de fluoruro y arsénico por arriba de las normas de consumo humano<sup>12</sup>.

Una vez que se ha conseguido la apertura gubernamental mediante la creación, por parte del gobierno, de conjuntos de datos abiertos, es importante enfocar los esfuerzos, tanto por la ciudadanía como por el propio gobierno (co-creación) para que dichos conjuntos de datos no se conviertan en un *cementerio de datos*. Es por esto que tanto su difusión como facilitar el uso de herramientas para su explotación es fundamental. A nivel internacional, tenemos un excelente ejemplo en el Portal Europeo de Datos Abiertos<sup>13</sup> donde además de contar con un buscador de conjunto de datos abiertos, estos ya se encuentran categorizados y se pueden hacer consultas utilizando tecnología semántica como lo es SPARQL.

El directorio de *casos de uso de datos abiertos* reúne proyectos implementados con este tipo de información<sup>14</sup>. Por ejemplo, se puede echar un vistazo a sus características principales, beneficios, cómo fueron usados los datos abiertos, así como los planes a futuro. Los casos resultan ser una excelente tribuna no solo para publicitar lo que se ha hecho en alguna localidad, sino para promover el que se pueda replicar el esfuerzo en otras comunidades con los mismos problemas o similitud de insumos. En México, la Estrategia Digital Nacional y el Portal de Datos Abiertos<sup>15</sup> pone a la disposición de los usuarios un compendio de conjuntos de datos abiertos producidos por las dependencias de la administración pública.

### La incidencia de los datos abiertos en las políticas públicas

William Thomson Kelvin dijo: “Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre”<sup>16</sup>. Es a partir de la información generada por el quehacer gubernamental por la que se *define* el cumplimiento de sus atribuciones y obligaciones. Mientras mejor especificada esté esta información (datos abiertos calidad 5 estrellas en cumplimiento a los instrumentos archivísticos bien definidos) será más fácil *medir* la eficiencia, eficacia y efectividad del gobierno. El análisis de dichas mediciones permitirá una toma de decisiones precisa para mejorar drásticamente la administración pública y el desempeño de sus programas sociales (políticas públicas)

Ahora bien, en los ejercicios tradicionales de transparencia gubernamental (transparencia reactiva) donde *se da lo que se pide* limita la información proporcionada, pues no considera la usabilidad o el formato óptimo de acuerdo con el uso que se le dará. Entonces, la democratización de la información resulta de muy poco alcance.

Es mediante la publicación de las *obligaciones de transparencia* (Ley General de Transparencia) que los tres niveles de gobierno en los tres poderes dan un paso considerable en poner al alcance de todos, la información gubernamental (democratizar la información). Un rumbo posible nos indica que mientras más se avance en la implementación de la transparencia proactiva o mejor aún, en la información pública abierta por diseño, y estos trabajos estén alineados a la normatividad aplicable (Ley de Transparencia y Ley de Archivos); así como, a los esfuerzos realizados por la Estrategia Digital Nacional, con datos abiertos calidad 5 estrellas, que se hablará de una auténtica democratización de la información, sin mencionar que dichos datos se convertirían, per se, en oro molido para la toma de decisiones gubernamentales y la implementación, medición y mejora de las políticas públicas en los tres niveles de gobierno.

Aunado a lo anterior, como ciudadanos debemos por un lado, exigir la transparencia de los datos y por otro lado, explotar los datos abiertos al crear nuevas iniciativas, monitorear el gasto público o simplemente evaluando e impacto que han tenido los programas en nuestra comunidad. El rol del ciudadano también debe cambiar para adecuarse a la nueva sociedad del conocimiento y encaminar

la gestión pública a las prioridades de las futuras generaciones. Es decir, queremos expresar que de la corresponsabilidad de los diversos actores sociales dependerá el buen aprovechamiento del gobierno abierto.

## Rumbo y oportunidades detectadas en Datos Abiertos

México lleva un largo camino recorrido en Gobierno y Datos Abiertos, sumándose a esfuerzos internacionales como al OGP y haciendo propios los ODS para mejorar la calidad de vida de la población mexicana. Sin embargo, es evidente el trabajo que se necesita realizar para alinear los esfuerzos gubernamentales en los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), de tal suerte que se eviten esfuerzos y resultados aislados; por el contrario, los esfuerzos puedan sumarse en una gran sinergia nacional que optimicen y potencien los recursos públicos.

Si bien es cierto que en un respeto del federalismo, los organismos gubernamentales involucrados han implementado ejercicios de gobierno abierto de manera independiente a lo largo y ancho del país. Se requiere gestionar el conocimiento y aprendizaje de los errores de otros; replicar las buenas prácticas descubiertas; optimizar las curvas de aprendizaje e implementar cada uno de estos ejercicios.

En cuanto a los Datos Abiertos en México, se reconoce el gran esfuerzo realizado tanto en la generación como en la publicación de los mismo; sin embargo, es evidente el hecho que producir datos abiertos sigue siendo una práctica costosa y por lo tanto aislada (no generalizada) dentro de la Administración Pública. Se propone que la información gubernamental no tenga que ser abierta por procesos independientes a la cual fue generada, sino que ya nazca abierta. Confiamos que la implementación de la recientemente publicada Ley General de Archivos habrá de dotar a la Administración Pública no solo de los instrumentos archivísticos; sino de los procesos y tecnología adecuada para que la información gubernamental ya nazca en datos abiertos por defecto, en un símil a la Privacidad por Diseño, que la Información Pública sea Abierta por Diseño.

## Referencias

1. Sitio web Alianza para el Gobierno Abierto <https://www.opengovpartnership.org/>
2. Decreto presidencial [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5382838&fecha=20/02/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5382838&fecha=20/02/2015)
3. Guía de implementación de Datos Abiertos [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5397117&fecha=18/06/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5397117&fecha=18/06/2015)
4. Ruiz de Teresa Mariscal, Guillermo. Objetivos de Desarrollo Sostenible en el plan de acción de México, Alianza para el Gobierno Abierto, 12 de abril de 2016. <https://www.opengovpartnership.org/stories/objetivos-de-desarrollo-sostenible-en-el-plan-de-acci-n-de-m-xico>
5. Plan de Acción 2016-2018: Tercer Plan de Acción Nacional de México en la Alianza para el Gobierno Abierto, Alianza para el Gobierno Abierto, Sustraído del sitio [https://www.opengovpartnership.org/sites/default/files/Mexico\\_Plan-de-Accion-2016-2018.pdf](https://www.opengovpartnership.org/sites/default/files/Mexico_Plan-de-Accion-2016-2018.pdf)
6. Carta Internacional de Datos Abiertos <https://opendatacharter.net/principles-es/>
7. Modelo de las 5 Estrellas de la Apertura de Datos <https://5stardata.info/en/>
8. Open Data Index <https://index.okfn.org/place/> y Open Data Barometer <https://opendatabarometer.org>
9. Proyecto Swim Guide <https://www.recreationalwater.ca/swimguide>
10. Proyecto Visaguas <http://visaguas.infoamazonia.org>
11. Proyecto Qué Pasa Riachuelo <http://www.quepasariachuelo.org.ar>
12. Proyecto GapMaps <https://gapmaps.org>
13. Sitio web Portal Europeo de Datos Abiertos <https://www.europeandataportal.eu/>
14. Sitio web del Directorio de casos de uso de datos abiertos <https://www.europeandataportal.eu/en/using-data/use-cases>
15. Sitio web Estrategia Digital Nacional y Portal de Datos Abiertos <https://datos.gob.mx/>
16. Enciclopedia [http://enciclopedia.us.es/index.php/Lord\\_Kelvin](http://enciclopedia.us.es/index.php/Lord_Kelvin)

## REDES COLABORATIVAS EN SEGURIDAD HÍDRICA

Mónica Nayeli Velasco-Estudillo

El presente texto es resultado de las entrevistas, cuestionarios y lectura a los casos presentados en este libro. El objetivo 6 de los ODS en el marco de la Agenda 2030 coloca nuevos retos en América Latina y el Caribe (ALyC) para proveer el servicio de agua de calidad a un precio asequible, equitativo y adecuado a las personas en situación de vulnerabilidad. La brecha actual entre lo rural y lo urbano en ALyC proviene en parte de la complejidad de la implementación de una política pública específica en agua potable y saneamiento; una débil institucionalidad (centralizada y con recursos humanos y financieros limitados); la población en situación de vulnerabilidad; el uso de tecnologías inadecuadas a los contextos rurales; la falta de empresas con experiencia y conocimiento del sector rural, y el bajo mantenimiento de los sistemas construidos<sup>1</sup>.

La disparidad de servicios urbanos y rurales dirige nuestra atención a lo rural, por lo que el estudio De la Peña y Álvarez<sup>1</sup> aporta reflexiones interesantes sobre la participación de los diversos actores durante el proceso completo (diseño, licitación, contratación de obra, construcción de sistemas, operación, evaluación y monitoreo) considerando los siguientes aspectos:

- a) la aportación de cada actor tales como sus capacidades, conocimientos, experiencia y soluciones probadas;
- b) el nivel de apropiación e involucramiento de las entidades locales del gobierno;
- c) la integración con programas de otros sectores; y,
- d) la sostenibilidad de las acciones a través de economías de escala, integración y coordinación con el trabajo social y comunitario para el logro de las metas e impactos previstos por los programas.

La complejidad de los problemas nacionales requiere soluciones pertinentes replicables y escalables; a la vez que consideren la problematización de lo local. La acción colectiva se convierte en una máxima que trae consigo nuevos problemas organizativos. La oportunidad de colaborar en red facilita la flexibilidad y pronta respuesta.

Los analistas del tercer sector sabemos que los sectores sociales presentan dinámicas distintas dependiendo de la necesidad de interacción entre los diferentes actores. En el caso del derecho humano al agua la presencia de las instituciones responsables de la calidad del agua es el punto de partida. El involucramiento de las agencias y los organismos operadores es primordial para la sostenibilidad de las acciones en este sector independientemente de que la visibilidad de la falta de calidad provenga de un anuncio anónimo, un informe oficial o una alerta académica.

El tema de transparencia y la rendición de cuentas con el gobierno permaneció como un tema de confianza institucional durante sexenios. Las empresas potabilizadoras de agua se han beneficiado de la desconfianza institucional para la comercialización de un bien público. Podemos apreciar el continuo crecimiento del mercado de agua embotellada a la par que la percepción de desabasto de agua de calidad<sup>2</sup>.

La apertura de datos públicos cambió la dinámica de interacción entre el Gobierno-Estado con la academia, el tercer sector, la ciudadanía y las empresas para convertirlos en socios de una decisión informada y de acción focalizada. En los casos del Libro se describe cómo el apoyo técnico-científico

de la academia e instituciones especializadas apoyan el diagnóstico, el diseño de soluciones sostenibles, la utilización de los avances científico-tecnológicos, la comunicación de riesgos, así como el monitoreo y evaluación de las acciones.

La responsabilidad social del científico no se restringe a comunicación entre pares y la divulgación científica; si bien, el derecho del agua nos recuerda el rol de la ciencia en la incidencia en políticas públicas y la aproximación con la ciudadanía y el tercer sector.

De la misma forma, las OSC y los emprendedores sociales utilizan la información para aportar soluciones en educación ambiental, tecnologías de agua sostenibles adecuadas al contexto y metodologías innovadoras basadas en la participación activa de la población afectada. En cada uno de los casos, este último es uno de los factores primordiales para generar acciones sostenibles. Es la ciudadanía la que se empodera a partir de estar informada y educada sobre los riesgos sanitarios a los que está expuesto por la exposición a agua contaminada; así como en conocer y decidir sobre las alternativas viables para el manejo de riesgo. La información validada, abierta y geo-referenciada facilita la toma de decisiones y guía la acción y evaluación con relación a la salud pública y la calidad del agua.

Los casos analizados no presentan una morfología de redes única<sup>3</sup>; de hecho, difieren a partir de la problemática y circunstancias tales como las fuentes de contaminación natural y antropogénica, la ubicación y el flujo del agua, la delimitación política territorial y los recursos disponibles para la solución del problema en la localidad. A diferencia de otros problemas sociales, la calidad del agua es prioritario para la población afectada y no compite entre transiciones políticas; pero sí con el presupuesto y recursos de localidades vecinas.

En uno de los casos, la interacción academia-gobierno fue suficiente para resolver el abastecimiento y saneamiento del agua potable de calidad; mientras que, en otras localidades se requiere la participación activa de la ciudadanía para activar la sensibilización, conciencia y acción focalizada; así como, la responsabilidad social de empresas que puedan estar contribuyendo a agravar o a solucionar el problema de contaminación natural del agua.

Como similitudes, se reconoce un interés de actuación a nivel local y la participación de diferentes organizaciones de la sociedad civil involucradas en diferentes sectores (salud, educación, medio ambiente, TIC) y con misiones compatibles. Los integrantes de las redes de agua colaboran con redes académicas, técnico-científicas y de tercer sector para la solución de problemas sociales. Se puede observar un sobre-especialización del conocimiento técnico-científico a la par que una mayor colaboración con científicos de ciencias naturales y sociales que aportan a la resolución del problema.

### Rumbo y oportunidades detectadas

Las redes de colaboración interinstitucionales e intersectoriales (ya sean de conocimiento, aprendizaje o innovación) permiten estructurar mecanismos de intercambio de recursos y capacidades disponibles en los diversos nodos de la red para lograr una visión compartida. Esto puede suceder cuando existen objetivos claros y compartidos, mecanismos de coordinación, gestión de conocimiento y una normatividad basada en la ética<sup>3</sup>.

Sin duda, las TICC han facilitado la comunicación y la gestión del conocimiento de los que componemos este tipo de redes; al mismo tiempo, han mejorado la interacción con la ciudadanía por medio de aplicaciones, sitios web, comunicación visual mediante mapas y diversos tipos de informes. Falta utilizar el potencial de otras tecnologías como la realidad virtual para dar cuenta de los testimonios y realidades como *Whitin*, iniciativa de las Naciones Unidas. Asimismo, facilitar el

uso de estas tecnologías por la población afectada y los tomadores de decisión según el nivel de apropiación de la tecnología considerada, el acceso a señal (SMS) e Internet (*brecha digital*) y el nivel de habilidades digitales de la población<sup>3</sup>.

Se requiere visibilizar la problemática en cada localidad afectada, razón de este libro, el INCA y las iniciativas como GapMaps. Para dar continuidad a este tipo de proyectos se considera como oportunidad que en un futuro cercano se requerirá del *voluntariado científico* capacitado técnicamente para realizar el monitoreo de la calidad de agua en sus localidades. Los ciudadanos afectados interesados en dar seguimiento y exigir la solución en sus localidades, otros ciudadanos laborando en las iniciativas de OSC, voluntariados científicos vinculados con la academia y funcionarios coordinados con todos los anteriores es de suma importancia.

La acción colectiva en red es adecuada para comprender y atender la problemática de saneamiento y provisión de agua de calidad a nivel nacional tanto en entornos rurales como urbanos. Sin embargo, la morfología de la red variará según las características socioculturales de las localidades, las OSC presentes, y la voluntad política de los municipios. A nivel federal se cuenta con buena voluntad política con el nuevo comité intersectorial de agua, la comunidad académica y el propio INCA.

El gobierno abierto y el uso de estas redes colaborativas de conocimiento persiguen contribuir a la estandarización de los datos abiertos de calidad de agua desde su creación, tratamiento y difusión a través de los protocolos de validación, procesamiento y comunicación. De acuerdo con la etapa de los datos se identifican diferentes públicos; por ejemplo, en la generación de datos es relevante que los protocolos se codiseñen y compartan con la comunidad científica y los laboratorios certificadores; que el tratamiento y análisis se realice con otras OSC, académicos y funcionarios; y en la comunicación con el público en general.

El interés es que los datos sean confiables, válidos, abiertos y comprensibles para la utilización de terceros, particularmente por la población afectada y los tomadores de decisión.

Para ello se deberá cumplir con todo lo comentado anteriormente acerca de los estándares nivel 5 estrellas, sumado a que los protocolos de mapeo permitan la geolocalización específica del metadato considerando localidad, tipo de toma, fuente, temporalidad, entidad que hizo la toma, entre otros datos relevantes.

La seguridad de los datos es de gran relevancia para resguardar la información sin permitir que se compartan datos que no han sido previamente validados o bien, que se indique el nivel de validación. Aún hay mucho trabajo por hacer y se considera una labor de equipo. Sí el agua es un derecho humano, pero también es responsabilidad de todos el que sea accesible y de calidad.

## Referencias

- <sup>1</sup> De la Peña, María Eugenia y Lourdes Álvarez. (2018). Ejecutar proyectos de agua y saneamiento en el sector rural: retos y desafíos en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo, IDB-TN-1439, págs 10-45.
- <sup>2</sup> Ortega Castañeda, Alfredo de Jesús. (2016). Los factores determinantes del aumento del consumo de agua embotellada en México: análisis desde el enfoque de políticas públicas. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Docencia Económicas. Sustraído de <http://hdl.handle.net/11651/1440> el 30 de julio de 2018.
- <sup>3</sup> Velasco Estudillo, Mónica Nayeli. (2016). Colaboración y transferencia de conocimiento en redes de alianzas: TIC, MiPyMES y OSC. INFOTEC Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación.

## CAPITULO 8. RECOMENDACIONES

### RECOMENDACIONES A LA CIUDADANÍA Y A LA SOCIEDAD CIVIL

1. Solicitar información sobre la calidad de agua de uso y de consumo humano de su zona, colonia o localidad, con énfasis en las concentraciones de arsénico y fluoruro, de los pozos y fuentes de abastecimiento locales, a las autoridades municipales, estatales y federales (Ej. CONAGUA, Juntas o comisiones municipales de agua potable, COFEPRIS, SEMARNAT, INEGI). Adicionalmente, solicitarla a otras instancias cuya especialización sea la calidad de agua, tales como centros de investigación, universidades locales, estatales o nacionales (Ej. INECC, IMTA, CIBNOR, etc.) y organizaciones de la sociedad civil.
2. Gestionar con las autoridades municipales, estatales y federales la información sobre la calidad del agua para consumo humano de su localidad.
3. Fomentar y apoyar la transparencia y rendición de cuentas de los programas relacionados con la calidad de agua, así como de las modificaciones a las normatividades expuestas en la sección 8.4.
4. Consultar la información disponible de calidad de agua de su zona o localidad en los sitios web oficiales y en otros, como los que se sugieren a continuación:
  - 4.1. Plataforma de Datos Abiertos del Gobierno de México <http://www.datos.gob.mx>
  - 4.2. Aplicación Nuestra Agua <https://app.agua.org.mx>
  - 4.3. Portal del Agua <https://www.agua.org.mx>
  - 4.4. Groundwater Assessment Platform, Gap Maps <https://www.gapmaps.org>
  - 4.5. Sitio Calidad de Agua ORG <https://www.calidaddelagua.org>
  - 4.6. Plataforma de Caminos de Agua <https://caminosdeagua.org/>
5. Distinguir el agua para beber y cocinar del agua para otros usos (baño, riego, limpieza, etc.).
6. En el caso de que se haya detectado en su localidad que el nivel de arsénico y/o fluoruro se encuentra por arriba de la norma o sospeche de una alta concentración por actividad minera cerca de la zona o evidencias de afectaciones a la salud (como las indicadas en el capítulo 3 del presente libro), se recomienda:
  - 6.1. No hervir ni tomar agua con sospecha de presencia de arsénico y/o fluoruro. Al hervir el agua con arsénico y/o fluoruro u otros elementos inorgánicos tóxicos, estos no se eliminan, sino, por el contrario, se concentran.
  - 6.2. Consumir y usar agua para la preparación de alimentos proveniente de fuentes alternativas:
    - 6.2.1. Agua embotellada.
    - 6.2.2. Captación de agua de lluvia con un proceso de filtración y/o purificación. *(Se sugiere usar las siguientes calculadoras para diseñar y dimensionar sistemas de cosecha o captación de agua de lluvia: <http://lluvia.cantaroazul.org/> y <https://caminosdeagua.github.io/calculadora-captacion-lluvia/>)*

- 6.2.3. Filtros especiales que indiquen su capacidad para remover arsénico y/o fluoruro del agua.
  - 6.3. Ir con su médico para revisar su estado de salud.
    - 6.3.1. En la exposición alta a fluoruro es notoria la fluorosis dental (se identifica en las manchas blancas y opacas en los dientes o dientes amarillos) que significa mayor riesgo de alteraciones neurológicas, endócrinas, renales y cardiovasculares, principalmente.
    - 6.3.2. La exposición alta a arsénico se destaca en las pigmentaciones o manchas en la piel, principalmente en el torso y la espalda, así como alteraciones en las palmas de los pies y manos (tales como callos o engrosamiento), lo que sugiere mayor susceptibilidad a los diversos efectos dañinos relacionados con la exposición, incluido el cáncer.
  - 6.4. Compartir la información a las autoridades correspondientes y a sus vecinos.
7. Ser más conscientes, como ciudadanos, del equilibrio entre el derecho al agua y el pago al servicio por el suministro de agua potable. El agua potable es un derecho humano, pero el suministro tiene un costo que debe mediar entre la población y el gobierno elegido.
  - 7.1. Cada caso específico debe analizarse bajo las perspectivas de justicia y equidad, conociendo el contexto de poder adquisitivo, condiciones de saneamiento, salud y bienestar de la población.
8. Promover la corresponsabilidad ciudadana durante todo el proceso de saneamiento y provisión de agua, particularmente para la rendición de cuentas sobre la calidad de agua suministrada.
9. Fomentar la participación activa de la ciudadanía en los procesos de diseño e implementación de las soluciones locales pertinentes a la problemática.
10. Participar activamente en su comunidad, particularmente en las iniciativas de las organizaciones. En los casos presentados en este libro, las iniciativas exitosas que han perdurado tuvieron la participación activa de la comunidad desde el principio, además del intercambio de saberes, la capacitación para el uso de la tecnología y la apropiación exitosa por parte de la comunidad para dar sostenibilidad al proyecto.

## RECOMENDACIONES A LA ACADEMIA

### Ciencias naturales

1. Proveer de estudios completos de la calidad del agua que incluya las determinaciones analíticas de las concentraciones de arsénico y fluoruro en todos los aprovechamientos (pozos, norias, ríos, lagos) que se utilicen o pudieran utilizarse como fuentes de agua potable en las localidades.
2. Identificar el origen (natural y/o antrópico) de la presencia de arsénico y/o fluoruro en los cuerpos de agua cuyas concentraciones sean iguales o superiores a las normas nacionales o internacionales, especialmente en aquellos sitios con ninguno o pocos estudios.
3. Determinar la influencia de la explotación y uso del agua (bombeo, riego, inyección) en las concentraciones, movilización y procesos geoquímicos del arsénico y el fluoruro.
4. Determinar los procesos geoquímicos e hidrogeológicos que influyen en la especiación y movilización de arsénico y fluoruro en los cuerpos de agua contaminados, principalmente en zonas poco estudiadas.
  - 4.1. Al respecto, se hace necesario evaluar las interacciones agua superficial-agua subterránea, suelo-agua subterránea, agua-roca en las zonas contaminadas por estos elementos.
5. Identificar y evaluar los procesos geoquímicos y de movilización de contaminantes (arsénico y fluoruro) en los suelos contaminados.
  - 5.1. Determinar las concentraciones de arsénico y fluoruro en suelos que pudieran aportarlos a cultivos o ser fuentes de exposición para la población.
  - 5.2. Determinar los procesos geoquímicos y de movilización de arsénico y fluoruro en los suelos contaminados.
6. Llevar a cabo estudios a nivel de investigación de los contaminantes en las cadenas tróficas de los cultivos regados con agua que contienen grandes cantidades de arsénico y/o fluoruro (determinar los grados de bioacumulación en alimentos, así como la transformación y toxicidad).

### Desarrollos tecnológicos

1. Desarrollar sistemas de tratamiento y saneamiento de agua tal que sean sostenibles y adecuados a las condiciones del país y de la localidad.
  - 1.1. Desarrollar y/o evaluar sistemas de tratamiento a nivel piloto bajo condiciones reales de las comunidades afectadas. Por ejemplo, utilizando agua contaminada de los sitios afectados para poner a punto los sistemas y/o procesos de tratamiento, no únicamente soluciones sintéticas de 'laboratorio' (agua destilada con concentraciones conocidas de arsénico, fluoruro, a diferente pH, etc.)
  - 1.2. Se conmina a que los desarrollos sean generados desde su diseño en colaboración activa con las comunidades y actores (tercer sector) a fin de entender las condiciones reales y sus necesidades.
    - 1.2.1. Por ejemplo, para una comunidad con acceso limitado a la electricidad y en condición de escasez, la ósmosis inversa no es una solución apropiada. Además

del tratamiento, es necesario fomentar e incentivar desarrollos orientados al uso de tecnologías y/o metodologías y planes de manejo para el mantenimiento, preservación de las aguas superficiales y subterráneas.

2. Supervisar la operación de las plantas de tratamiento existentes en el país para la remoción de arsénico y/o fluoruro y proponer medidas para asegurar su operación adecuada de manera continua.
3. Construir un inventario de las tecnologías disponibles, a fin de compararlas y evaluar los costos-beneficios en su implementación, además de realizar una valoración de la transferencia tecnológica con perspectiva de derechos humanos a fin de beneficiar a la población más vulnerable.
4. Desarrollar procesos innovadores que tiendan a ser más eficientes y menos costosos, tanto a nivel intra-domiciliario para dar respuesta a pequeñas comunidades rurales aisladas, como a nivel centralizado en diferentes escalas de tratamiento.
5. Analizar el ciclo de vida de los materiales usados en los procesos de remoción de fluoruro y arsénico del agua, manejo integral y disposición adecuada de los residuos: sorbentes, membranas, agua de rechazo de los sistemas de ósmosis inversa, entre otros.

## Salud

1. Realizar estudios epidemiológicos encaminados a caracterizar la prevalencia de enfermedades con alta carga ambiental, como las enfermedades no-transmisibles de tipo crónico.
  - 1.1. Dichos estudios requieren de gran aporte de recursos y son de larga duración. Es importante la optimización de los modelos de evaluación de la exposición crónica y sus efectos a largo plazo.
  - 1.2. Evaluar los niveles, rutas y fuentes de exposición a arsénico y fluoruro, principalmente en poblaciones vulnerables como la infantil, mujeres embarazadas y adultos mayores.
2. Indagar sobre las fuentes de exposición al arsénico y al fluoruro.
3. Ahondar en los efectos neurológicos, cardiovasculares, renales, metabólicos, inmunológicos y endócrinos de la exposición a fluoruro; ya que los estudios son escasos, a pesar de la información abundante a nivel nacional sobre la exposición a fluoruro, denotada por la presencia de fluorosis dental.
4. Identificar si la exposición a fluoruro está asociada al cáncer, actualmente está clasificado por la Agencia Internacional del Cáncer como probable carcinógeno.
5. Conocer si existe interacción en la exposición a arsénico y fluoruro que pueda potenciar o exacerbar los efectos en la salud observados por cada uno de manera individual.
6. Fortalecer las capacidades del personal técnico en la evaluación de riesgo e identificación de factores de susceptibilidad que ayude a reconocer tempranamente a individuos que pudieran estar en riesgo. Particularmente hacerlo desde una perspectiva institucional para que las acciones puedan perdurar.
7. Participar más activamente con los diferentes sectores de la sociedad en la propuesta y desarrollo de normativas.

### Ciencias sociales y humanidades

1. Involucrar al tercer sector integrado por los ciudadanos de las comunidades afectadas, las organizaciones de la sociedad civil (OSC), comités o movimientos ciudadanos, voluntarios y organizaciones de base en el proceso de definir prioridades de investigación.
2. Analizar casos en contextos específicos de las implicaciones sociales, éticas, económicas y políticas de la calidad del agua en temas relacionados con:
  - 2.1. Calidad de vida y seguridad hídrica
  - 2.2. Tejido social y derecho al agua
  - 2.3. Política social del agua de calidad con enfoque en derechos humanos
  - 2.4. Costo, justicia y equidad del agua de calidad
  - 2.5. Soberanía de los pueblos y seguridad alimentaria
  - 2.6. Derechos y autonomía de los pueblos indígenas y los derechos de la naturaleza
3. Sugerir y validar los cambios a nivel de innovación pedagógica (técnicas, herramientas y contenidos), legislativa y de capacitación docente para la educación ambiental; así como la participación y opinión de la comunidad a las posibles soluciones y/o tratamiento del agua.
4. Revisar el nivel de apropiación de las tecnologías y costes, así como la caracterización de la población y nuevas metodologías para el intercambio de saberes y conocimiento con la comunidad.
5. Armonizar y proponer los cambios necesarios a fin de que cada mexicano tenga acceso al agua de calidad.

## RECOMENDACIONES A ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

### Comunicación incluyente

1. Informar regularmente a la población sobre la calidad del agua suministrada por diferentes medios adecuados y pertinentes a la comunidad y las audiencias.
  - 1.1. Utilizar diferentes medios (radio, televisión, periódico, plataformas sociales) y espacios públicos.
  - 1.2. Traducir la información sensible a las etnias-lenguas del lugar.
  - 1.3. Utilizar comunicación incluyente y adecuada a otros lenguajes aptos para personas con alguna discapacidad.

### Validación transparente

2. Probar el funcionamiento de los sistemas y su eficiencia a manera de información pública con la debida transparencia y rendición de cuentas.
3. Mostrar los registros de los estudios de pruebas de laboratorio que demuestren la calidad del agua a tratar y la eficiencia de los procesos para garantizar el cumplimiento de la normatividad en lo referente a la calidad del agua para consumo humano.

### Operación

4. Diseñar e implementar programas de capacitación y permanencia del personal técnico orientados a la operación y mantenimiento adecuado y *continuo* de los sistemas de potabilización y renovación de los mismos; así como la verificación de tuberías de distribución del agua para limitar al máximo las fugas en la conducción de agua potable.
5. Desarrollar manuales y guías donde documenten la implementación y operación de sus procesos tecnológicos.
6. Asegurar el suministro continuo y adecuado de los insumos requeridos para la operación de los sistemas de potabilización del agua (reactivos, membranas, etc.).

### Monitoreo

7. Contar con un programa de control analítico de calidad de agua que especifique las características del sistema de abastecimiento de agua, la caracterización, los parámetros de control de la calidad del agua y la frecuencia de los muestreos que realizan.
8. Implementar un sistema de monitoreo en las fuentes de abastecimiento de agua para la población y en los tanques de distribución o pozos de abastecimiento de agua.
9. Promover la capacitación del personal a través de programas institucionales como los ofrecidos por la Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento (ANEAS).
10. Contar con presupuesto para la gestión del monitoreo de calidad de agua tanto en la fuente de abastecimiento, como antes y después del tratamiento y en las diferentes etapas o tanques de distribución.
  - 10.1. Por ende, la labor del organismo será el solicitar, presupuestar y ejercer tales recursos destinados al monitoreo de la calidad.

## RECOMENDACIONES A LAS AUTORIDADES Y TOMADORES DE DECISIONES

1. Apoyar la aprobación y el cumplimiento del “Proyecto de Norma Oficial Mexicana Proy-NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua” donde se contempla la disminución de las concentraciones límites para arsénico de 0.025 a 0.010 mg/L y para fluoruro de 1.5 a 1.0 mg/L en el agua..
2. Reconsiderar una modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-013-SSA2-2015 con respecto a la suplementación de fluoruro a través de la sal (250 mg de fluoruro/Kg de sal) en localidades donde el agua de consumo humano es menor a 0.7 mgF/L, para la prevención de caries dental.
  - 2.1. Se han documentado concentraciones altas de fluoruro en orina de habitantes de regiones con concentración baja de fluoruro en agua, sugiriendo la presencia de fuentes de exposición adicionales al agua; por lo que, la suplementación a través de la sal merece ser reconsiderada.
3. Aumentar los presupuestos dirigidos a la prevención y a la atención de zonas y localidades vulnerables, en riesgo o expuestas.
4. Conciliar la gestión económica del recurso con su aspecto ambiental al considerar la dinámica natural del agua y sus ciclos antes que las necesidades políticas y económicas.
5. Implementar estrategias y programas integrales en comunicación de riesgos y educación ambiental sobre aspectos generales del ciclo del agua; el funcionamiento y mantenimiento de cuerpos de agua, implicaciones de la disminución en su calidad y disponibilidad.
6. Informar y concientizar a la población, (campañas) sobre el costo del servicio de tratamiento de agua y los daños a la salud que ocasiona no tratarla.
7. Educar desde el nivel de educación básica, sobre aspectos del agua, tales como los procesos naturales relacionados con el origen, la edad, el comportamiento físico-químico y biológico, la disponibilidad y la calidad del recurso.
  - 7.1. Recomendamos que los libros de textos para la educación básica se modifiquen a fin de que integren estos conocimientos y no sólo se aborde el aspecto del ciclo del agua y sus tres estados naturales.
  - 7.2. Trabajar en la cultura del agua y su difusión para que tanto los operadores de agua como la ciudadanía entiendan el problema, acepten la solución y se pague el costo real del servicio. En general, los Organismos Operadores no necesitarán incrementar sus tarifas, sino más bien incrementarían su recaudación al tener más usuarios satisfechos con el servicio.
8. Implementar estándar de datos y mecanismos abiertos y participativos para las contrataciones abiertas en las compras públicas, licitaciones y erogaciones del presupuesto público en tecnologías, plantas de tratamiento, sistemas de saneamiento y control de la calidad del agua. A fin de apoyar el Gobierno Abierto y la gestión participativa de la seguridad hídrica.<sup>1</sup>
9. Promover e incentivar la administración inter-institucional de la seguridad hídrica de los tres poderes y los ámbitos federales, estatales y municipales al promover mecanismos de coordinación, cooperación e inclusive presupuesto compartido.
10. Ampliar los criterios que se consideran para calificar la calidad de agua potable para incluir medidas preventivas para la contaminación por fluoruro y arsénico en la nueva Ley de Aguas.

## Plantas potabilizadoras

11. Las instituciones responsables de la vigilancia de calidad de agua y salud deben exigir a los Organismos Operadores de Agua y Saneamiento el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas relacionadas con el abastecimiento de agua y su potabilización.
12. Facilitar y ampliar el apoyo económico por parte de los gobiernos estatales y federal para mantener y operar las potabilizadoras como un compromiso real por parte de los responsables de los Organismos Operadores, quienes deben comprender los beneficios que aportan a la sociedad y no solo considerarlas como una carga económica.
13. Capacitar y certificar a los operadores y responsables de las plantas potabilizadoras, para asegurar el entendimiento correcto de los fundamentos de los procesos de tratamiento, las tareas de operación y mantenimiento, así como el programa de control de calidad a implementar.
14. Adecuar los requisitos, criterios y métodos de evaluación para asignar los contratos a empresas que demuestren experiencia, capacidad técnica y solvencia económica.
  - 14.1. Las instituciones que hacen licitaciones para diseño y construcción de plantas potabilizadoras presentarán estos nuevos mecanismos y serán sujetos a rendición de cuentas.
15. Simplificar o adecuar la tecnología de las potabilizadoras para que operen con austeridad. Es decir, con el mínimo equipamiento electromecánico y requerimientos de insumos, y cuando lo requieran, éstos deben ser en lo posible de fabricación y distribución nacional, para facilidad de adquisición, mantenimiento y reemplazo.

En el segundo tomo revisamos cuestiones sobre inequidad ambiental, política agraria para el aprovechamiento de agua y regulación del uso mediante tecnologías, la política de salud socio ambiental, descargas y tratamiento de aguas residuales, así como, la política social para los afectados.

## Referencias

- <sup>1</sup>Gestión participa y Gobierno Abierto. <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/el-gobierno-de-mexico-es-un-gobierno-abierto-que-fomenta-cada-dia-mas-la-transparencia-y-la-rendicion-de-cuentas-enrique-pena-nieto>

## CAPÍTULO 9. REFLEXIONES FINALES

“La ética y la inteligencia conducen a un mismo fin: la unidad que es la verdad.”

- Anónimo

A continuación, se comparten las reflexiones finales de algunos de los autores y participantes de esta obra:

“Una de las principales fuentes de vida es el agua, tanto la de consumo como la de uso. Durante décadas no hemos visualizado correctamente que su calidad es primordial para ambos aspectos. Se ha considerado que si es cristalina o filtrada por las rocas tiene la calidad adecuada para el consumo humano. Si la tecnología ha avanzado para determinar compuestos no visibles - que a ciertas concentraciones ocasionan daños a la salud - es urgente tomar las acciones necesarias para impedir que siga sucediendo. Como profesionales de la salud, es nuestra obligación difundir el problema de la mala calidad en el agua para el consumo humano, la cual está siendo distribuida en México como agua ‘potable’. Investigadores en México hemos comprobado que los niveles de fluoruro y arsénico son altos, que para este caso el hervir o clorar el agua no resuelve el problema, que no debe ser utilizada para la preparación de los alimentos y que las autoridades deben informar a la población. Aunque la situación no es sencilla, prepararse y trabajar en conjunto en todos los niveles conlleva a mejorar las condiciones de salud en México. Queremos ver sonrisas de dientes blancos en la población infantil y disminuir las posibilidades de enfermedades crónicas en los adultos. Tapar el problema no lo resuelve y debemos entender que las decisiones actuales están afectando a nuestras siguientes generaciones.”

*María Deogracias Ortiz Pérez,  
Comisión técnica y comité de validación INCA  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí*

“La calidad de agua potable repercute directamente en la salud de la población que la consume, reflejándose en altos costos indirectos de salud pública, deterioro de la calidad de vida y de bienestar de las comunidades. Dicha situación no se ve, mucho menos se considera; es prácticamente desconocida tanto por la población, como - desafortunadamente - por los administradores del agua y tomadores de decisiones. Por ello resulta urgente abordarla de forma holística, integral, considerando tanto los aspectos sociales, técnicos y económicos involucrados.”

*Ma. Teresa Alarcón Herrera,  
Comisión técnica y comité de validación INCA,  
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Durango*

“El problema del agua potable en México tiene muchas aristas, todas ellas complejas. En la mayor parte del país se dificulta implementar las acciones necesarias para asegurar el derecho humano al agua en el corto o mediano plazo, tales como: amplia cobertura de agua entubada, cantidad suficiente, calidad adecuada, continuidad, confiabilidad y costo razonable. Al ser los Organismos Operadores directamente responsables de la potabilización, distribución, desalojo y tratamiento del

agua, requieren que sus finanzas sean sanas para poder llevar a cabo su función adecuadamente; además de contar con la capacidad técnica suficiente para tomar las decisiones más convenientes en cuanto a la tecnología a aplicar. Entre los aspectos que impiden un buen funcionamiento de los sistemas operadores de agua se pueden mencionar: infraestructura que ya cumplió su vida útil o está a punto de alcanzarla; altos porcentajes de fugas a nivel de tuberías de abastecimiento; tarifas que no reflejan los costos reales de operación y mantenimiento; resistencia de la población a pagar el servicio; baja eficiencia de cobro en general, o nula, cuando se trata de los grandes consumidores de agua; rotación excesiva y falta de capacitación del personal requerido para que funcionen los sistemas; baja eficiencia de personal, algunas veces relacionada con problemas laborales ligados a los sindicatos; insuficiencia de estudios técnico-económicos para tomar las mejores decisiones en las inversiones o realización indiscriminada de estudios que finalmente no se toman en cuenta; selección de empresas sin experiencia en la construcción de obras; falta de supervisión de los proyectos y las obras, lo cual origina el consecuente desperdicio de recursos y tiempo; falta de autonomía en el manejo de los recursos, los cuales muchas veces se utilizan en campañas electorales; politización del tema agua y, sobre todo, corrupción; entre otros. Algunos especialistas del sector opinan que la mejor solución es dar 'llave en mano' a las empresas para el diseño, construcción y operación de los sistemas de tratamiento durante varios años; pagándoles la inversión por metro cúbico de agua tratada que cumpla con la normatividad vigente. Sin embargo, bajo esos esquemas no se puede asegurar que quien gane una licitación va a implantar la tecnología más eficiente y económica para resolver el problema en cuestión. Efectivamente, podrá ser la opción más económica de las que concursen, pero no necesariamente la mejor en cuanto a todas las posibles soluciones existentes.

Tal vez, si la población civil presiona fuertemente para exigir su derecho humano al agua, se lograría que la toma de decisiones fuera más expedita. El problema es que exigir un derecho implica también el cumplimiento de una obligación; y el pago del servicio, al precio justo, implica una real toma de conciencia nacional. El colmo de todo esto es que la población más desfavorecida, económicamente hablando, es la que paga más cara el agua que usa en sus casas, cuando la tienen. Y en el tema de calidad, son muy pocas las zonas del país en donde los consumidores tienen información del posible daño que el agua está provocando a su salud por consumirla sin el tratamiento adecuado. Carecemos de programas de educación y sensibilización suficientes para atender el tema del agua y su actual problemática.

La normatividad nacional ya está rebasada por la presencia de un mayor número de contaminantes que no se están regulando. Esto nos indica que el marco legal existente está desactualizado, es complejo y difícil de cumplir, sobre todo bajo una política hídrica que no tiene fuerza para implementarse a través del tercer nivel de la autoridad del agua. Adicionalmente, la inversión en investigación y desarrollo tecnológico no es suficiente, sus esfuerzos se encuentran muy fragmentados y no apuntan hacia el fortalecimiento de materiales e insumos que permitan romper con la dependencia tecnológica que actualmente eleva en demasía los costos de cualquier alternativa que se necesite implementar.”

*Alejandra Martín Domínguez y Arturo González Herrera,  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

“El consumo de agua contaminada con arsénico y/o fluoruro daña a la salud, disminuye la calidad y la esperanza de vida y afecta la economía de la comunidad, ya que decae su productividad, aumenta significativamente los recursos destinados al tratamiento de las enfermedades y representa una carga adicional para el Sistema de Salud. Las mujeres embarazadas y la población infantil son más vulnerables a los efectos nocivos que causa el agua contaminada con arsénico y/o fluoruro. El efecto

hacia una sociedad donde sus futuras generaciones tengan menor desarrollo de sus capacidades intelectuales y productivas y se altere su inserción en la vida social, resulta devastador.”

*Luz María Del Razo,  
Comisión técnica y comité de validación INCA,  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados - IPN*

“La sobreexplotación del agua evidencia una injusticia estructural. Es como una cadena que no deja avanzar a las comunidades y sobre todo a la gente de la vida rural. El campesino y el ciudadano más débil no son la causa de que salga de las tuberías agua que envenena. Ellos están pagando, sin saberlo, el costo social que les arrojan los que utilizan el agua intensivamente para la industria y la agroindustria.

Para romper esa cadena, lo primero debe ser aceptar la realidad sobre las condiciones de nuestros acuíferos. Aceptar dónde están los pozos contaminados y ofrecer esa información de manera pública para que la gente conozca su situación. Si se les está ofreciendo veneno, que la gente lo sepa y pueda tomar medidas.

Segundo, ir a las causas. No dar aspirinas para el cáncer. Si se está acabando el acuífero y los niveles de explotación ya no son sustentables, se tiene que poner un alto a las concesiones de los pozos. La prioridad deben ser los usuarios del agua para consumo humano, no el uso industrial ni agroindustrial de exportación. Las comunidades que dependen del agua para su subsistencia biológica y cultural son las primeras que habrían de hacer valer su derecho humano al agua. La visión que se ha tenido de supuesto desarrollo - basado en el extractivismo - no cuida, sino devasta.

En tercer lugar, tomar en cuenta a las comunidades en la decisión de sus soluciones; fortalecer a las comunidades en su organización interna y no romper los procesos comunitarios de organización y de solidaridad con dádivas, con soluciones que quedan a medias, muchas veces porque están pensadas para los cortos plazos electorales. Fortalecer a las comunidades. Ellas tienen realmente muchas soluciones desde lo pequeño y desde lo chiquito. Pero hay que atender estas dos partes: apoyar la organización comunitaria y promover también la solución del problema más de fondo, lo que está detrás de que el agua nos llegue contaminada.”

*Juan Carlos Zesati,  
Pastoral Campesina y Hermandad de la Cuenca de la Independencia*

“Es indispensable realizar investigaciones en todos los acuíferos que se utilicen como fuentes de agua potable para determinar las concentraciones, distribución y origen del arsénico, fluoruro y otros posibles contaminantes, considerando las características hidrogeológicas. Deben eliminarse todas las fuentes de contaminación antropogénica hacia los cuerpos de agua.

En los sitios con concentraciones elevadas de dichos contaminantes deben identificarse fuentes de agua seguras y, en caso de no existir, establecer sistemas de tratamiento o de cosecha de agua de lluvia que eviten la exposición y la afectación a la salud de los pobladores.

Muchos de los sitios con problemas de contaminación por arsénico y fluoruro se encuentran en municipios de bajo nivel económico lo que dificulta la operación de las plantas de tratamiento que

se establezcan. Es necesario apoyarlos a nivel estatal y federal de manera expedita, sin eximir a los pobladores de aportar a la misma en la medida de sus posibilidades.

Deben promoverse investigaciones para desarrollar sistemas de tratamiento que sean sustentables y adecuados a las comunidades.”

*Ma. Aurora Armienta,  
Comisión técnica y comité de validación INCA,  
Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*

“La magnitud de la problemática debida a la contaminación por arsénico y fluoruro en agua para uso y consumo humano se ha conocido gracias al número significativo de estudios de calidad del agua que han aportado información. En una buena proporción, estos estudios surgen a través de proyectos de investigación de la comunidad científica, de reportes de resultados de organizaciones de la sociedad civil, entre otros, los cuales complementan - muy convenientemente - los reportes oficiales de la calidad del agua, particularmente la subterránea, aportando información sobre fuentes de abastecimiento que no forman parte de la Red Nacional de Monitoreo. Sin embargo, aún es de alta prioridad generar y dar a conocer los estudios de calidad del agua, sobre todo en localidades que no están incluidas en esta Red Nacional de Monitoreo, y/o actualizarlos, considerando que algunas fuentes de agua ya no se aprovechan o existen nuevas fuentes de abastecimiento de agua para la población. Estos estudios deben aportar información suficiente sobre el control de calidad analítico, que en muchos reportes es insuficiente o no existe, pero que es necesario en el proceso de validación de los datos de calidad del agua.”

*Ma. Catalina Alfaro De la Torre,  
Comisión técnica y comité de validación INCA,  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí*

“Asegurar y mantener la calidad de agua para nosotros y las generaciones futuras requiere de un esfuerzo colectivo que comienza por la conciencia de esta problemática. Hacer realidad la frase *El agua es vida*, en este espectro, implica valorar y cuidar este preciado recurso. Una importante lección es estudiar cada contexto para detonar soluciones sociales, tecnológicas y económicas pertinentes, pero siempre acompañados de los afectados. Y como científicos, acompañar estos procesos al divulgar el conocimiento, abrir datos de las investigaciones, compartir los hallazgos, y sobre todo hacerlos comprensibles a diversas audiencias.”

*Mónica Nayeli Velasco Estudillo,  
Comisión de comunicación y comité de recursos INCA,  
CONACYT-UAM Azcapotzalco Posgrado Integral de Ciencias Administrativas*

“El acceso al agua potable de calidad suficiente que no represente un riesgo a la salud humana se vuelve, cada vez más, una problemática común a nivel global. Por lo anterior, es de vital importancia que gobierno, academia, organizaciones civiles y sociedad en conjunto, realicemos las acciones que nos corresponden a cada uno para poder seguir disponiendo de este recurso vital. Es en este ámbito que los Organismos Operadores del agua tienen un rol muy importante, implementando un manejo sustentable del agua, cambiando los manejos lineales actuales de extracción, distribución, uso y descarga por manejos circulares más sustentables, donde se incluya el tratamiento y reuso del

agua. La academia, a su vez, aporta investigación y aplicación del conocimiento para la innovación tecnológica y científica. Por último, y no por eso menos importante, se encuentran las Organizaciones de la Sociedad Civil y la sociedad en general, los cuales, como usuarios finales del agua, necesitan ser partícipes de la problemática para poder darle el valor que se merece y asegurar su disponibilidad para las generaciones futuras. Recordemos que el agua no tiene PRECIO, tiene VALOR.”

*Mario Alberto Olmos Márquez,  
Universidad Autónoma de Chihuahua*

“Una sociedad que reconoce los valores múltiples del agua y es sensible a los problemas ambientales asociados a su uso; que es capaz de identificar los principales retos planteados para que ésta sea usada de una forma más sostenible; que adopta comportamientos responsables en su relación con el agua y que apoya las iniciativas colectivas orientadas a hacer un buen uso de los recursos hídricos, es la mejor garantía de la utilización racional del agua.”

*María Teresa Gutiérrez,  
Comisión de comunicación INCA,  
Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental*

“Jaques Cousteau, oceanógrafo que pasó la mayor parte de su vida en alta mar, dijo alguna vez *olvidamos que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno solo*. El agua no es solo un recurso o un derecho, el agua es vida en sí misma. No hay vida sin agua, son inseparables, y la vida como el agua no se comercian, se valoran. Sin embargo, ¿cuál sería el instrumento más apropiado para estimar con exactitud el valor social, cultural, y económico del agua?

Como se mencionó en el Capítulo 3.5, el ciclo del agua rige y mantiene el equilibrio de los ecosistemas, de los cuales el humano es un integrante importante, pero no único. Cualquier acción que vulnere o reduzca el equilibrio de los ecosistemas, eventualmente repercutirá sobre la salud y el bienestar humanos. Antes que hablar de salud humana, habrá que hablar del equilibrio en el ecosistema y, por ende, del mantenimiento del ciclo del agua. La valorización del agua tendría entonces que priorizarse en términos ambientales y luego socioeconómicos. En este sentido, las acciones encaminadas a entender y mantener el ciclo del agua, así como su interacción directamente con la salud y bienestar humanos, serán trascendentales para definir los términos específicos y las estrategias sobre las cuales se tendrá que poner pronta atención y acción.

El entendimiento y mantenimiento del ciclo del agua, en todos sus contextos, no es tarea única para los planeadores y responsables del servicio, es una obligación también del usuario. Como muchos retos socio/ambientales, la educación y comunicación eficiente y oportuna, es necesaria para empoderar a todos los involucrados (*detrás y delante del grifo*), para una toma de decisiones informada, fluida y transparente que promueva beneficios a corto y largo plazo.”

*Mariana Cárdenas González,  
Comisión técnica y de comunicación INCA,  
Harvard Medical School, EUA*

“Es indispensable implementar tecnologías tomando en cuenta al usuario, desde la evaluación del caso hasta su seguimiento a lo largo del tiempo. Para incidir en las políticas públicas existe un vacío en temas educativos y de capacitación en temas de agua y en la sensibilización de problemáticas como la contaminación del agua subterránea y superficial. Se deben promover trabajos sustentables para crear y mantener la infraestructura del agua con la participación de los habitantes de las comunidades y promover mecanismos para el cumplimiento a las leyes de agua que protejan los acuíferos de la sobreexplotación, como los decretos de veda. Las organizaciones de la sociedad civil enfrentamos hoy numerosos retos para implementar soluciones urgentes: colaboración entre organizaciones e instancias académicas y oficiales, planteamiento estratégico para la suma de esfuerzos, participación en foros, generación de coaliciones, conformación de espacios de diálogo multidisciplinario, autocrítico y horizontal, formación permanente en metodologías para el trabajo en grupo, etc. Es necesaria una transformación profunda desde el interior de cada individuo y su grupo de acción.”

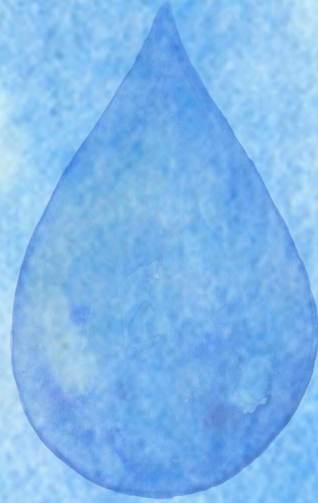
- Casilda Barajas, Caminos de Agua

Te invitamos a colaborar y compartir tus propias ideas, perspectivas y reflexiones. Buscamos conectar voluntades y generar acciones para avanzar - en conjunto - hacia el cumplimiento del derecho humano al agua en México.

[calidad@agua.org.mx](mailto:calidad@agua.org.mx)  
Comisión de comunicación y comité de vinculación INCA  
Coordinación CHMAS

*Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*, editada por el Instituto de Geofísica, UNAM.  
Creado en Agosto de 2021, en la Editorial del Instituto de Geofísica.





El agua, un líquido vital para la supervivencia del ser humano, ha significado una continua preocupación para quienes se dedican a su estudio y el de sus contaminantes. Por ello, la divulgación, sensibilización, concientización y ofrecer alternativas se vuelven asuntos de primera importancia. En este libro se aborda de forma integral el complejo panorama del agua ante la creciente presencia del arsénico y fluoruro, principales contaminantes inorgánicos que ponen en riesgo la salud ambiental y humana en México. Entre estas páginas se encuentra el esfuerzo colectivo de 60 autores del sector académico, científico, sociedad civil y emprendimiento socioambiental que significa una gran aportación para la humanidad.

