

Análisis de la distribución espacial de la calidad del agua en **el acuífero Valle del Gadiana**

Analysis of the Spatial Distribution of Water Quality **in the Gadiana Valley Aquifer**

Eliud Abraham Gutiérrez Rodríguez,* Félix Alonso Alcázar Medina, *María Teresa Alarcón Herrera**
y María Dolores Josefina Rodríguez Rosales*



Monitoreo de la calidad del agua/Biserka Stojanovic/Stockphoto.

* Instituto Tecnológico de Durango, eliud_rdgz@hotmail.com, felix.alcazar@hotmail.com y mdjoserr@itdurango.edu.mx, respectivamente.

** Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. (CIMAV), Unidad Durango, teresa.alarcon@cimav.edu.mx.

Este trabajo es un análisis de las aguas subterráneas del Valle del Guadiana mediante información recopilada de 117 pozos monitoreados por Aguas del Municipio de Durango y la Comisión Nacional del Agua, complementados con datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano de muestras de sedimentos de ríos y arroyos. Utilizando un método matemático de evaluación de la calidad del agua, se identificaron el arsénico y el fluoruro como los principales contaminantes. Los resultados indican que estos tienen un origen geogénico de tipo secundario, afectando significativamente al acuífero.

Palabras clave: arsénico; fluoruro; co-Kriging; calidad del agua.

Recibido: 23 de enero de 2024.

Aceptado: 27 de junio de 2024.

Introducción

La calidad del agua subterránea es un tema crítico en la hidrogeología y salud pública, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos son limitados (OMS, 2008).

El arsénico (As) y el fluoruro (F) son dos contaminantes prevalentes en el agua subterránea, conocidos por sus efectos adversos en la salud humana. El primero puede causar una variedad de enfermedades, incluyendo cáncer y afecciones cardiovasculares, mientras que el segundo, en concentraciones elevadas, puede llevar a la fluorosis dental y esquelética (Chávez, 2010; Reyes *et al.*, 2016).

En el acuífero Valle del Guadiana se ha registrado la presencia de contaminantes en concentraciones superiores a las permitidas por la normatividad para consumo humano, principalmente As y F (Alarcón *et al.*, 2001; Alarcón *et al.*, 2020; Barrientos, 2017; Chávez, 2010; Martínez *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2020; Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, 2020). Además, se ha detectado cromo (Cr) en algunas localidades (Chávez, 2010), por lo que

This work is an analysis of the groundwater in the Guadiana Valley, using information collected from 117 wells monitored by Aguas del Municipio de Durango and the National Water Commission, complemented with vector data from the Mexican Geological Service of sediment samples from rivers and streams. Using a mathematical method of water quality assessment, arsenic, and fluoride were identified as the main contaminants. The results indicate that these have a secondary geogenic origin, significantly affecting the aquifer.

Key words: arsenic; fluoride; co-Kriging; water quality.

es importante mantener un monitoreo continuo de su distribución.

El presente estudio tiene como objetivo la evaluación de la distribución espacial de la calidad del agua subterránea para abastecimiento público en el acuífero Valle del Guadiana, mediante los siguientes enfoques:

- Identificación de los contaminantes que la afectan, comparando las concentraciones con los límites permisibles establecidos por la normativa mexicana NOM-127-SSA1-2017 (Salud *et al.*, 2019).
- Aplicación de un método matemático para evaluar la calidad del agua.
- Determinación del origen de los contaminantes.

Descripción del área de estudio

El acuífero Valle del Guadiana se localiza en el municipio de Durango, Durango (ver mapa 1); cuenta con una superficie de 4 817 km² y un área de 14 % bajo decreto de veda desde 1956 y bajo suspensión del libre alumbramiento desde 2013 (CONAGUA, 2013).

El clima de la región es semiárido y las aguas subterráneas del acuífero son la principal fuente del vital líquido para 673 753 habitantes, de los cuales 91.43 % se concentra en la ciudad de Victoria de Durango, capital del estado, y el resto, en 773 localidades (INEGI, 2020).

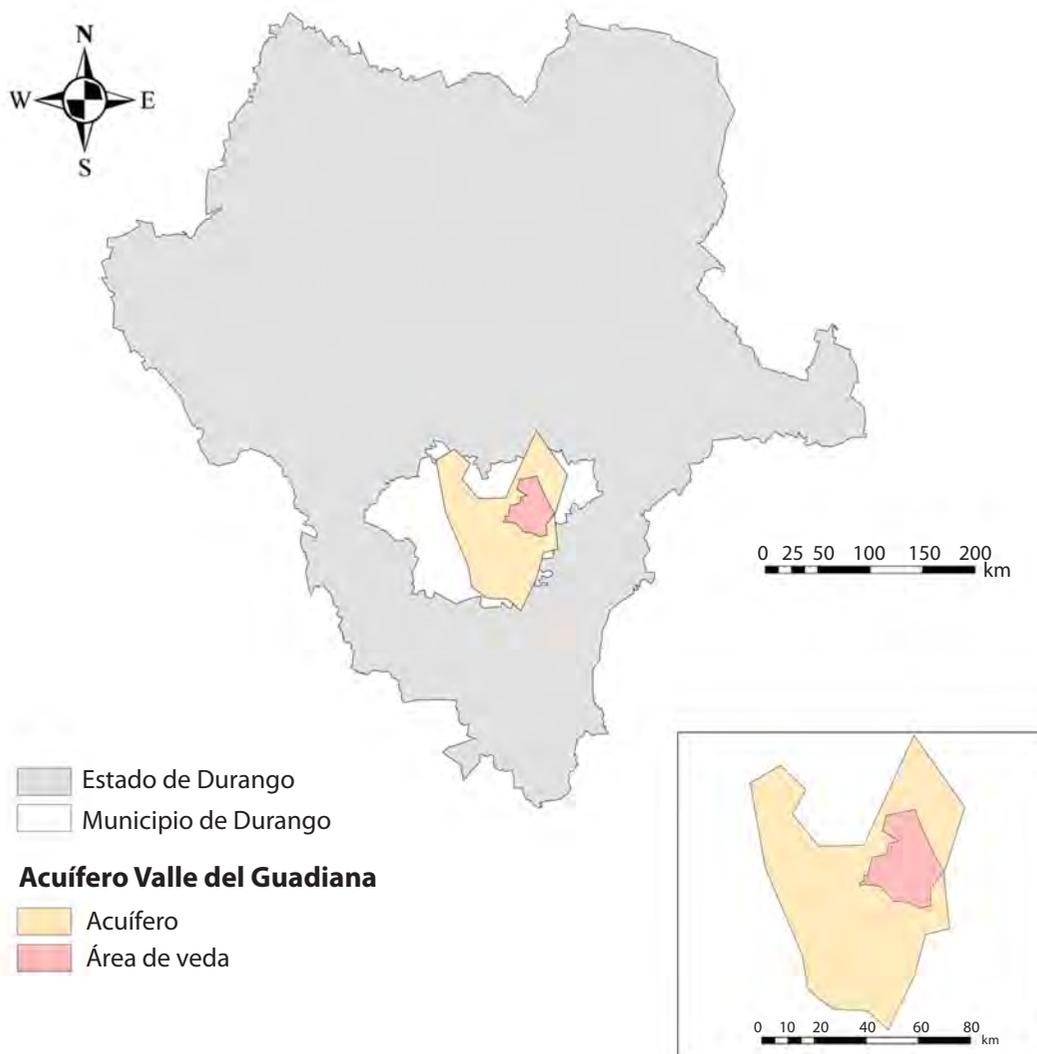
Hasta el 2020, el Registro Público de los Derechos del Agua contaba con información de un total de 1 267 aprovechamientos subterráneos, represen-

tando anualmente un volumen de 127 004 902.50 m³, del cual 51 % era de uso público urbano; 25.61 %, para el agrícola; 12.23 % se empleaba en diferentes usos; 5 %, en el ámbito industrial; y el resto se distribuía entre los acuícolas, domésticos, pecuarios y de servicios (CONAGUA, 2020).

La geología del acuífero está conformada por rocas volcánicas, principalmente riolitas y basaltos (62.80 y 15.79 % de cobertura, respectivamente),

Mapa 1

Localización del acuífero en el municipio de Durango, Durango



Fuente: Elaboración propia.

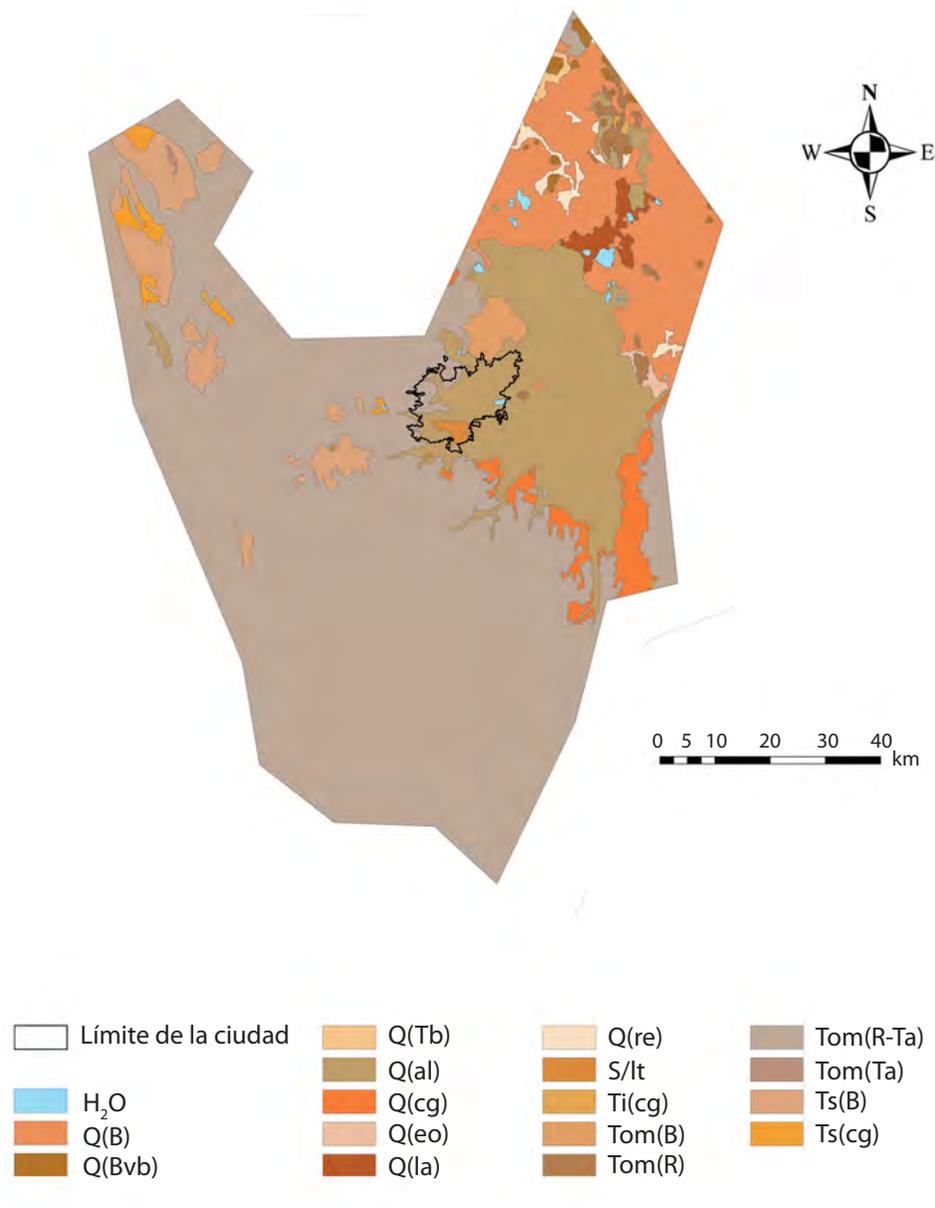
así como una formación aluvial (INEGI, 1998). El mapa 2 presenta sus afloramientos geológicos.

Al noreste del acuífero se localiza el Campo Volcánico de Durango (CVD), una planicie de unos 2

100 km² cubierta por derrames volcánicos que representan un volumen estimado de 20 km³ y, aproximadamente, 100 conos de ceniza o lava de la era cuaternaria (Aranda *et al.*, 2015). El mapa 3 muestra la localización del CVD, según el Centro

Mapa 2

Afloramientos geológicos del acuífero



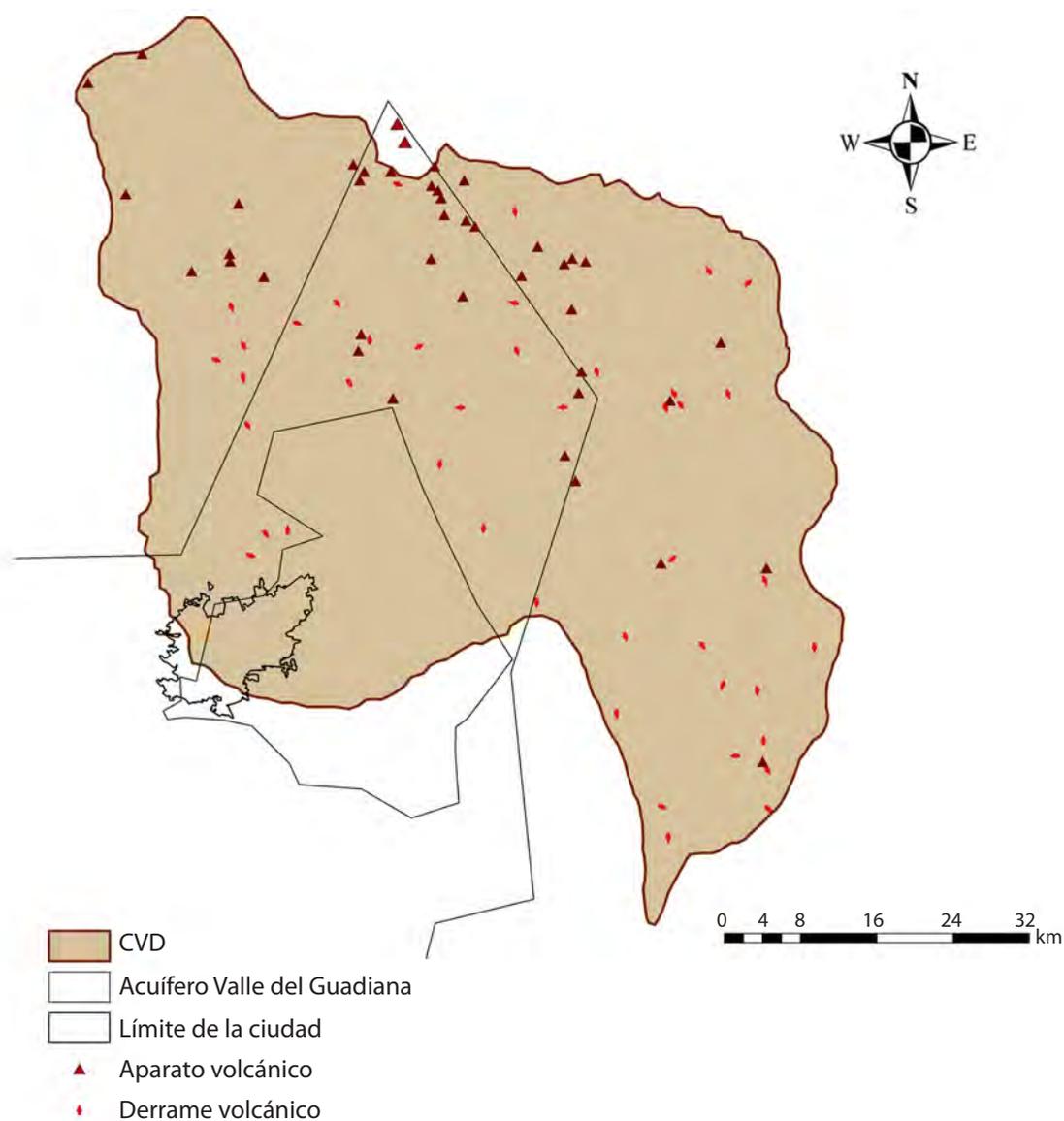
Fuente: Elaboración propia.

Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019). Los aparatos volcánicos La Breña y El Jagüey, ubicados a 40 km al norte de la ciudad de Victoria de Durango, son los únicos volcanes reconocidos en el CVD. En rocas de estos se registran minerales como olivino, plagioclasa, piroxeno (Aranda *et al.*, 2015; Rovira *et al.*, 2019). En esa misma orientación, en los límites de la zona urbana,

se encuentra la mina principal del municipio, denominada Cerro del Mercado. En ese lugar, Peter y Barton (1999) dan cuenta de minerales como augita, barita, calcita, carbonato-hidroxiapatita, dióxido, fluorapatita, yeso, hederibergita, hentutita, magnetita, martita (hematita), mordeanita, ópalo, atapulgita, pirita, cuarzo, sepiolita, titanita, timidita y circón.

Mapa 3

Localización del CVD en el acuífero Valle del Guadiana



Fuente: Elaboración propia.

El mapa 4 presenta los afloramientos hidrogeológicos del acuífero, obtenidos de la carta *Zonas hidrogeológicas* del INEGI (2008). Sus valores y permeabilidad se constituyen de la siguiente manera:

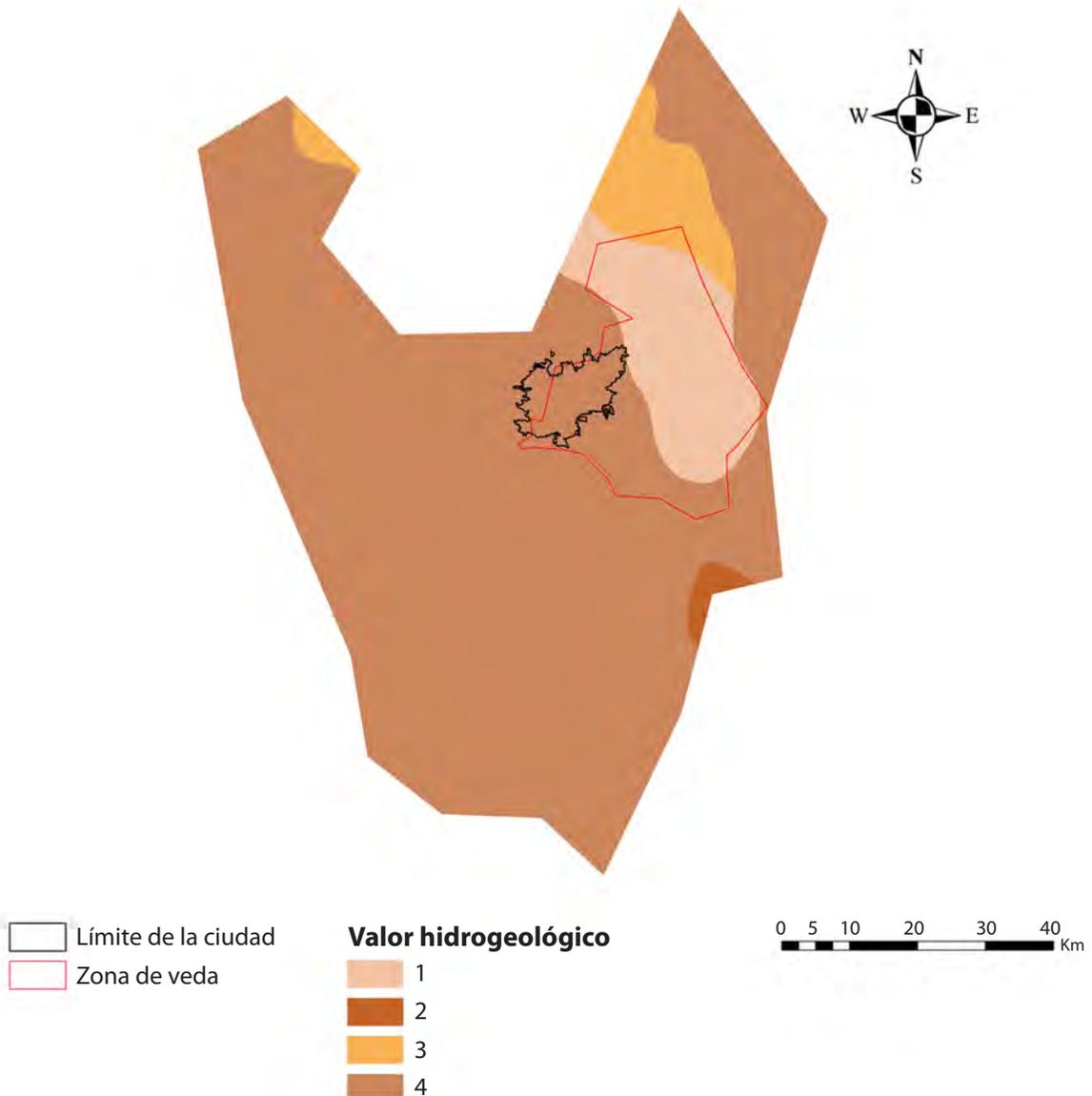
- 1: gravas, arenas y limos, media a alta.
- 2: lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, baja a alta.

- 3: areniscas y conglomerados, media a alta.
- 4: rocas volcánicas, principalmente basálticas y andesíticas (lavas, brechas y tobas), media a alta.
- 5: rocas volcánicas (lavas, brechas y tobas), predominando riolitas, baja a media.

La *Carta geoquímica* del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017) registra 103 muestras de

Mapa 4

Hidrogeología del acuífero



Fuente: Elaboración propia.

sedimentos activos de ríos y arroyos en el acuífero, en las que se aprecian concentraciones de As desde 2.17 hasta 39 mg/kg. El mapa 5 presenta su localización y el 6, los rangos de concentración de As en sedimentos, observándose que las más elevadas se ubican en el noreste, este y centro del acuífero.

Materiales y métodos

Obtención de información

Se utilizaron dos bases de datos principales para el análisis de la calidad del agua en el acuífero Valle del Guadiana:

1. De la CONAGUA (2017-2020):
 - Incluye registros de 18 pozos monitoreados para el abastecimiento público.

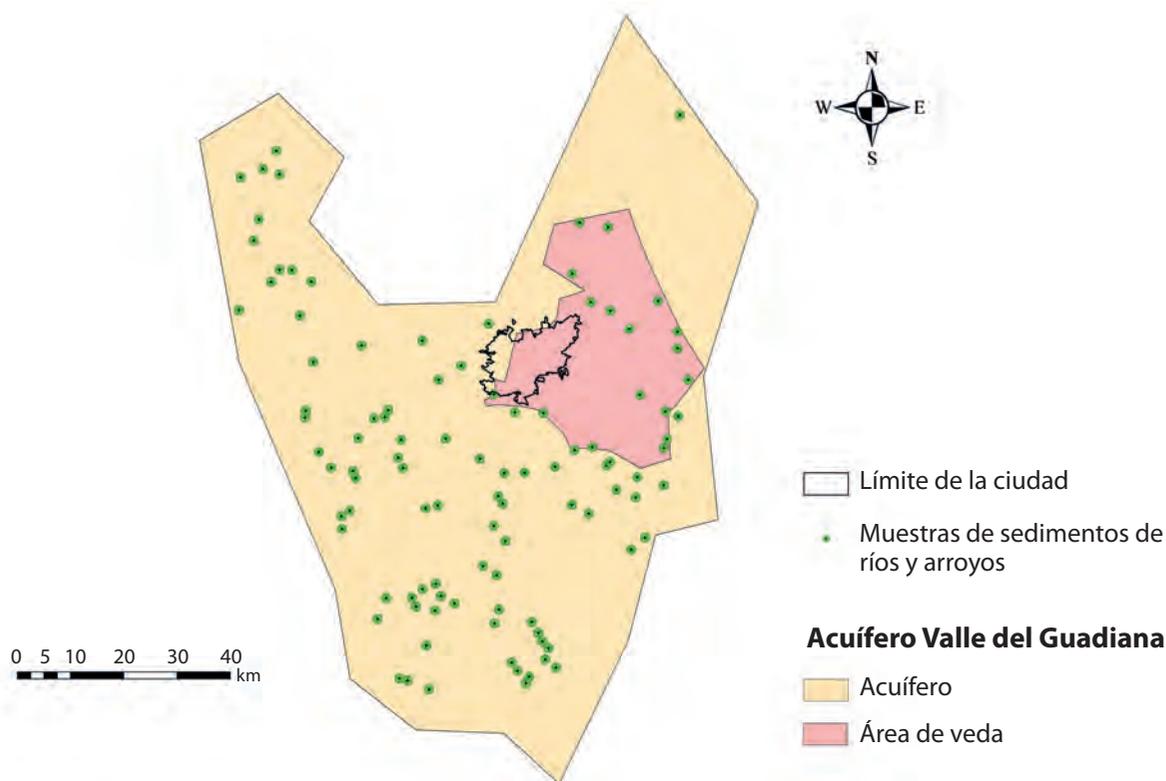
- Variables fisicoquímicas: temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), pH, As, F⁻, sólidos disueltos totales (SDT), bicarbonato (HCO₃⁻), nitratos (NO₃⁻), sulfatos (SO₄⁻), cloruros (Cl), hierro (Fe), manganeso (Mn), dureza (como CaCO₃), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), cadmio (Cd), Cr y plomo (Pb).

2. Del organismo descentralizado Aguas del Municipio de Durango (AMD) (2017-2020):
 - Incluye datos de 99 pozos de abastecimiento público ubicados en la ciudad de Victoria de Durango.
 - Variables fisicoquímicas: pH, As, F⁻, SDT, NO₃⁻, SO₄⁻, Cl, Fe, Mn y dureza (como CaCO₃).

Además, se utilizaron datos vectoriales de las 103 muestras de sedimentos de ríos y arroyos de la

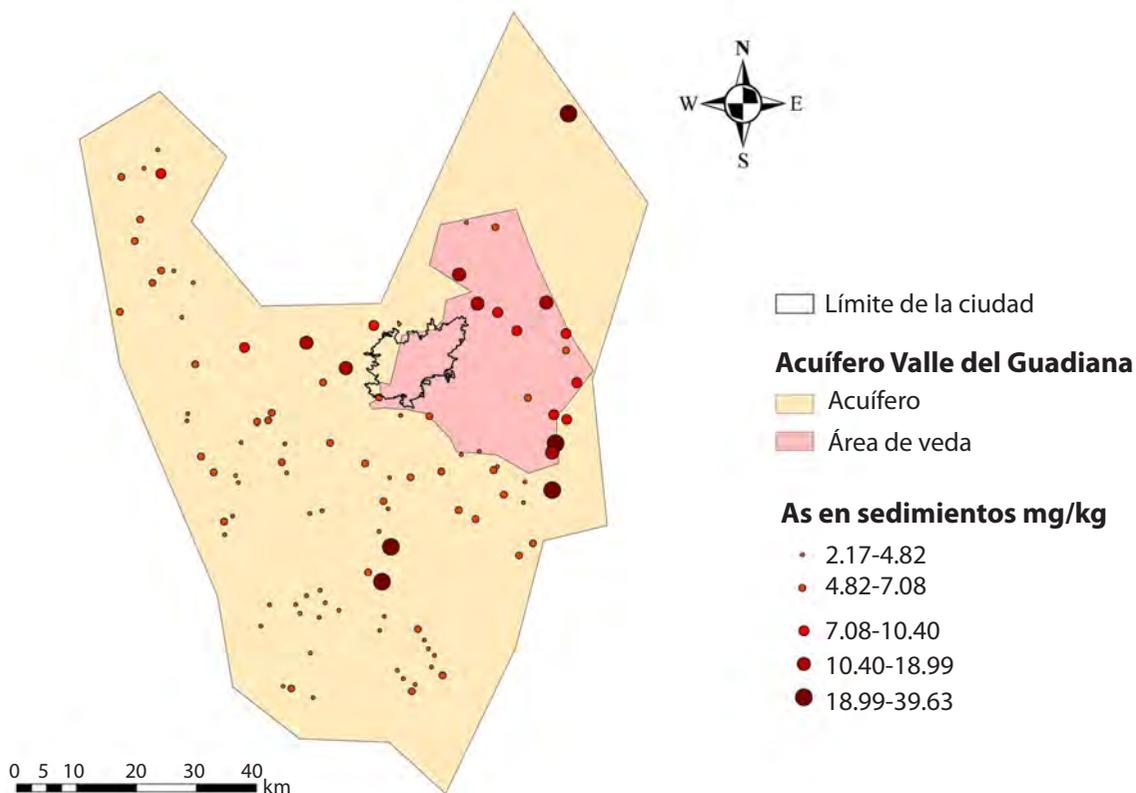
Mapa 5

Distribución de muestras de sedimentos en ríos y arroyos



Fuente: Elaboración propia.

Contenido de As en sedimentos de ríos y arroyos



Fuente: Elaboración propia.

Carta geoquímica del SGM para estudiar la distribución del arsénico.

El mapa 7 presenta la distribución de los pozos de abastecimiento público en el acuífero Valle del Guadiana.

Modelación de la distribución espacial del As y F⁻

Para ello, se utilizaron los datos del 2020 de la CONAGUA y el AMD y se empleó el método de interpolación co-Kriging, basándose en las siguientes correlaciones:

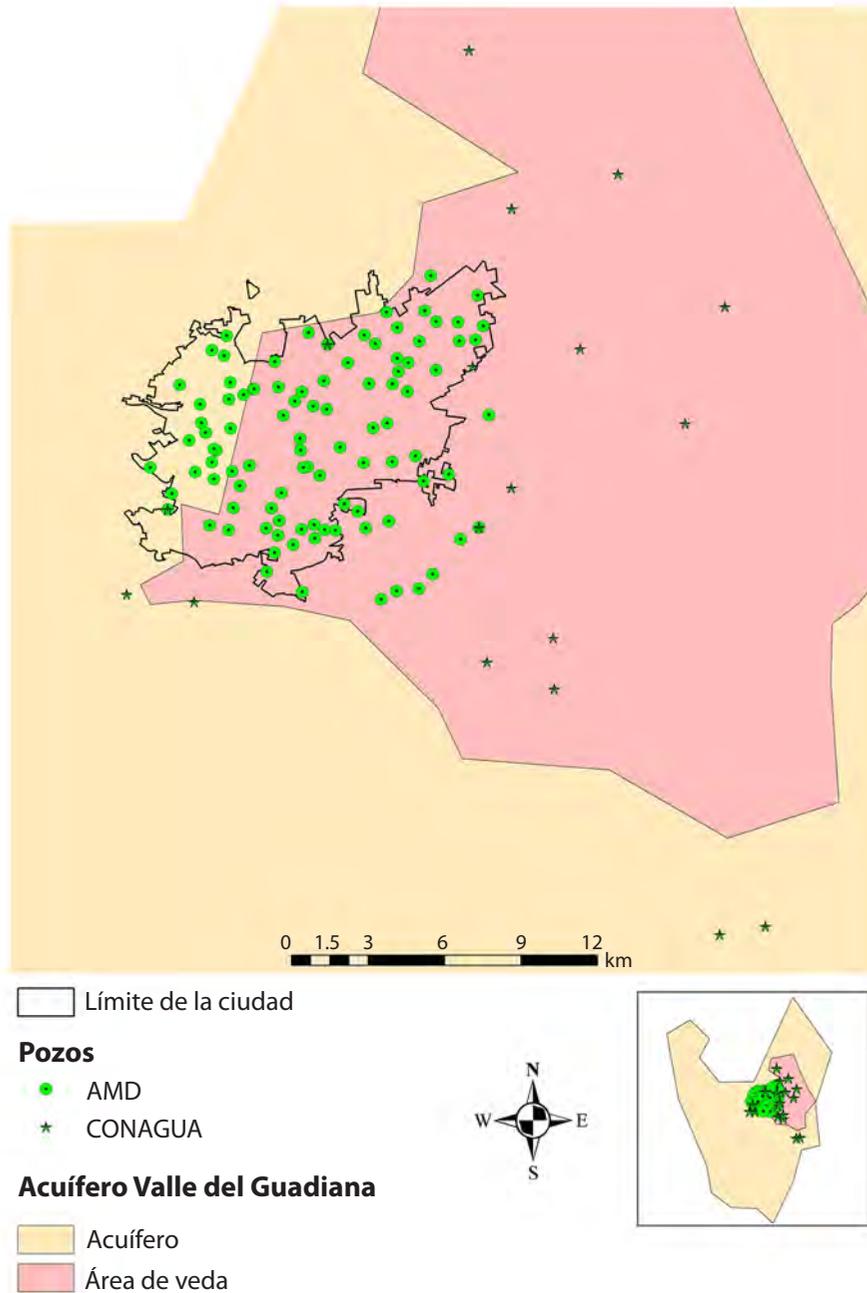
- As en agua subterránea con As en sedimentos de ríos y arroyos.
- F⁻ con As en agua subterránea.

La representación cartográfica se realizó conforme a los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-2017, utilizando el sistema de proyección de coordenadas WGS 1984, UTM zona 13, hemisferio norte (x, y, z). La validación de los modelos se efectuó mediante el método de entrenamiento con 10 % de los datos.

Calidad del agua

Esta se evaluó con la caracterización de parámetros físicos, químicos y biológicos de las muestras, considerando los límites tolerables y los valores máximos según el uso del recurso (CONAGUA, 2021). En México, la Comisión Nacional del Agua, a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, hizo un seguimiento a 1 292 sitios para mantos subterráneos

Ubicación de los pozos de los organismos AMD y CONAGUA



Fuente: Elaboración propia.

en el 2020, tomando en cuenta 14 indicadores fisicoquímicos y microbiológicos.

La clasificación de la calidad del agua se realizó mediante un semáforo:

- Verde: concentraciones por debajo de los límites permisibles de la NOM-127-SSA-2017.
- Amarillo: incumplimiento en CaCO₃, CE, SDT, Mg y Fe.
- Rojo: excesos en CF, F, NO₃, As, Cd, Cr, Hg y Pb.

Índice de la Calidad del Agua (ICA)

Este se define como la expresión numérica que proporciona el efecto de cada uno de los parámetros de calidad del agua en la de su condición general para permitir su cuantificación como *buena* o *mala* (Varol *et al.*, 2021; Van Dao, 2020).

Para conocer el impacto en la calidad del agua de las concentraciones del As y F⁻ con otras variables, se aplicó el Índice de Calidad de las Aguas del Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME-WQI, por sus siglas en inglés), con datos del periodo 2017-2020, y los parámetros pH, SDT, Cl, dureza (CaCO₃), Fe, As, F⁻, Mn, SO₄ y NO₃, bajo los límites permisibles para agua de consumo humano de la NOM-127-SSA-2017.

El CCME-WQI mide el alcance, la frecuencia y la amplitud de los excesos en la calidad del agua y luego combina las tres medidas en una sola puntuación. El cálculo produce de entre 0 y 100: cuanto mayor sea mejor será su condición. Los puntajes se clasifican en una de las cinco categorías que se describen a continuación (CCME, 2017):

- Excelente (valor 95-100): la calidad del agua está protegida con una virtual ausencia de deterioro; las condiciones están muy cerca de los niveles prístinos.
- Muy buena (89-94): está protegida con una ligera presencia de deterioro; las condiciones están cerca de los niveles prístinos.
- Buena (80-88): está protegida con solo un grado menor de deterioro; las condiciones rara vez se apartan de los niveles deseables.
- Regular (65-79): por lo general, está protegida, pero ocasionalmente se ve afectada; las condiciones a veces se apartan de los niveles deseables.
- Marginal (45-64): se deteriora con frecuencia; las condiciones a menudo se apartan de los niveles deseables.
- Pobre (0-44): siempre está deteriorada; generalmente, las condiciones se apartan de los niveles deseables.

Las ecuaciones para el cálculo del CCME-WQI se tomaron de ese organismo canadiense (CCME, 2017).

Se elaboró la cartografía del CCEM-WQI mediante el *modelamiento* del ICA obtenido en cada pozo.

Análisis estadístico

Se realizaron los siguientes:

1. Regresión lineal, entre As y F⁻ y variables piezométricas (profundidad, nivel estático y consumo) en 99 pozos de la ciudad de Victoria de Durango.
2. Correlación de Pearson entre As y F⁻ en 117.
3. Matriz de correlaciones de Pearson para identificar correlaciones de As y F⁻ con los iones CaCO₃, Cl, SO₄ y Fe en 99 pozos de la ciudad.

Factores asociados a la presencia de los contaminantes

Se realizó una consulta bibliográfica de la presencia de As y F⁻ en minerales, rocas y sedimentos del acuífero. También, se revisaron las correlaciones identificadas entre As y F⁻ con los iones.

Estas metodologías proporcionaron una visión integral de la calidad del agua subterránea y la distribución de contaminantes tóxicos en el acuífero Valle del Guadiana, permitiendo identificar los factores que influyen en la presencia de esto.

Resultados y discusión

Modelos de la distribución espacial del As y F⁻

Los que se desarrollaron abarcan una superficie de 832.49 km², cubriendo la ciudad de Victoria de Durango y la mayor parte de la zona bajo veda. Los errores medios obtenidos para los modelos de As y F⁻ fueron de 0.0034 y 0.005, respectivamente.

En el 2020, los rangos de concentraciones de As fluctuaron entre 0.001 y 0.28 mg/l (mapa 8), mientras que las de F⁻ oscilaron entre 0.2 y 25.73 mg/l (mapa 9), excediendo los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2017, que son de 0.01 mg/l para As y 1 mg/l para F⁻.

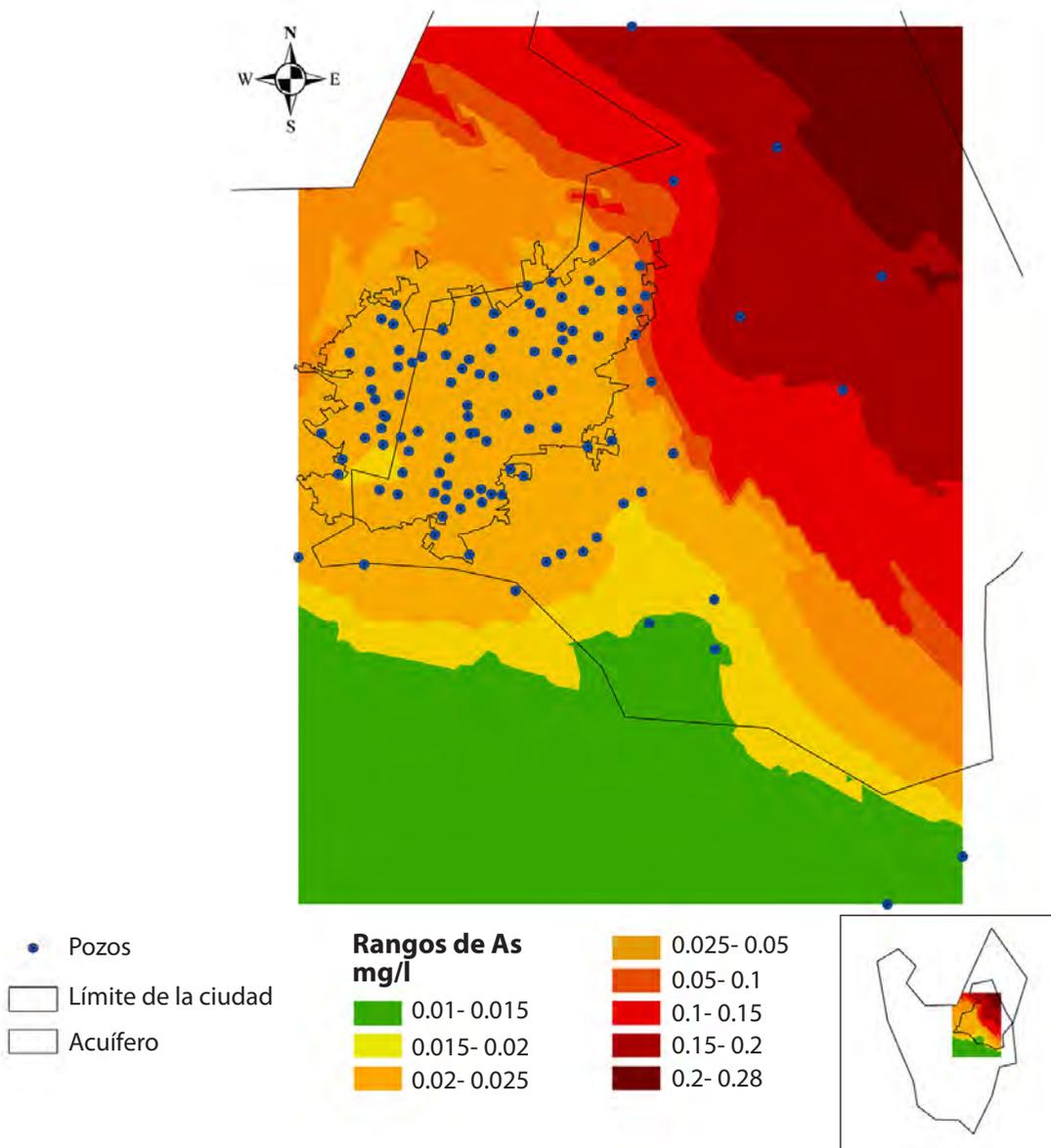
Las concentraciones más elevadas de ambos contaminantes se encontraron en localidades al noreste de la ciudad de Victoria de Durango. El

cuadro 1 muestra aquellas que presentaron las más altas de As y F⁻, detectadas específicamente en General Lázaro Cárdenas y Colonia Hidalgo. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que reportaron niveles similares en estas localidades (Martínez *et al.*, 2013).

En la ciudad, los niveles de As variaron entre 0.015 y 0.030 mg/l, mientras que los de F⁻ se situaron entre 2.5 y 6 mg/l, superando también los límites normativos.

Mapa 8

Distribución espacial del As



Fuente: Elaboración propia..

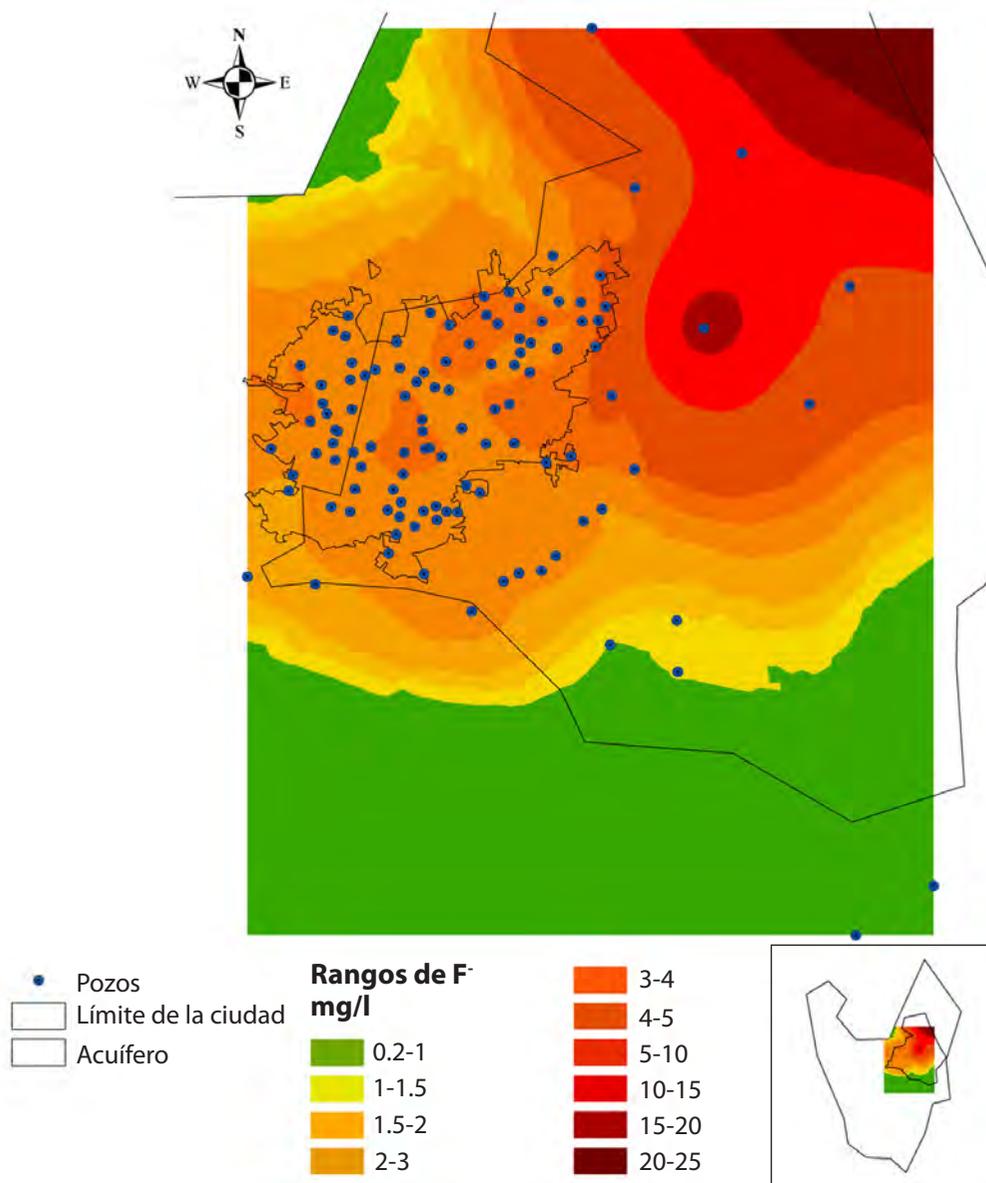
Cuadro 1

Localidades con las concentraciones más elevadas de As y F⁻

Localidad	As mg/l	F ⁻ mg/l
Colonia Hidalgo	0.202	12.00
General Lázaro Cárdenas	0.196	13.50
Navocoyán	0.284	25.73
Francisco Villa Viejo	0.128	7.23
Belisario Domínguez	0.069	5.45

Mapa 9

Distribución espacial del F⁻



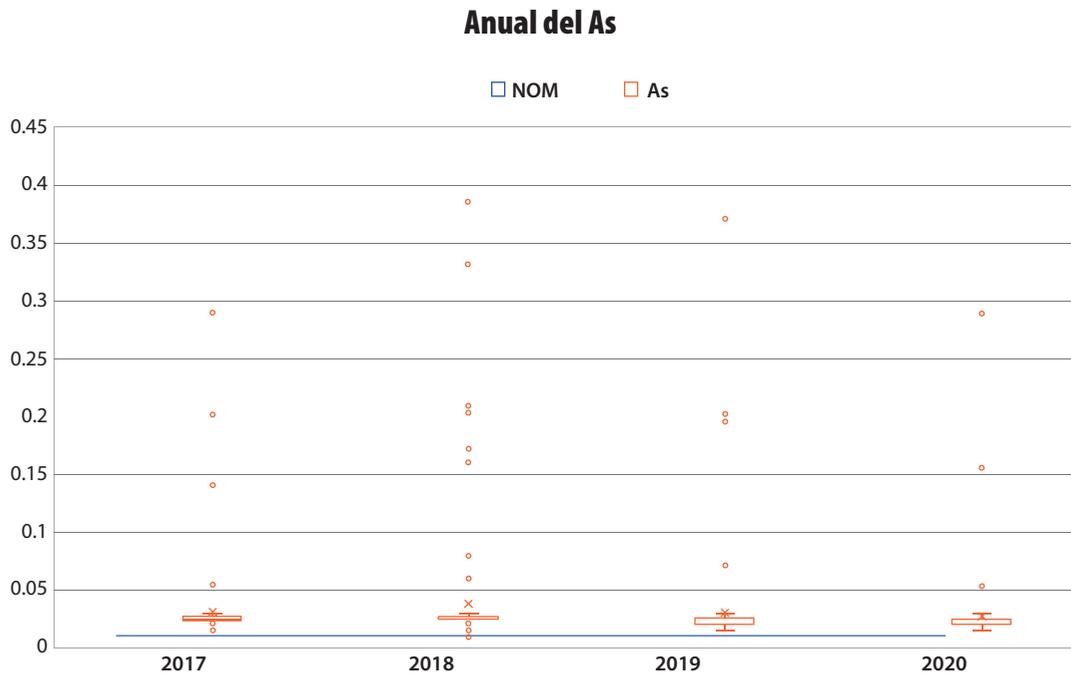
Fuente: Elaboración propia.

Calidad del agua

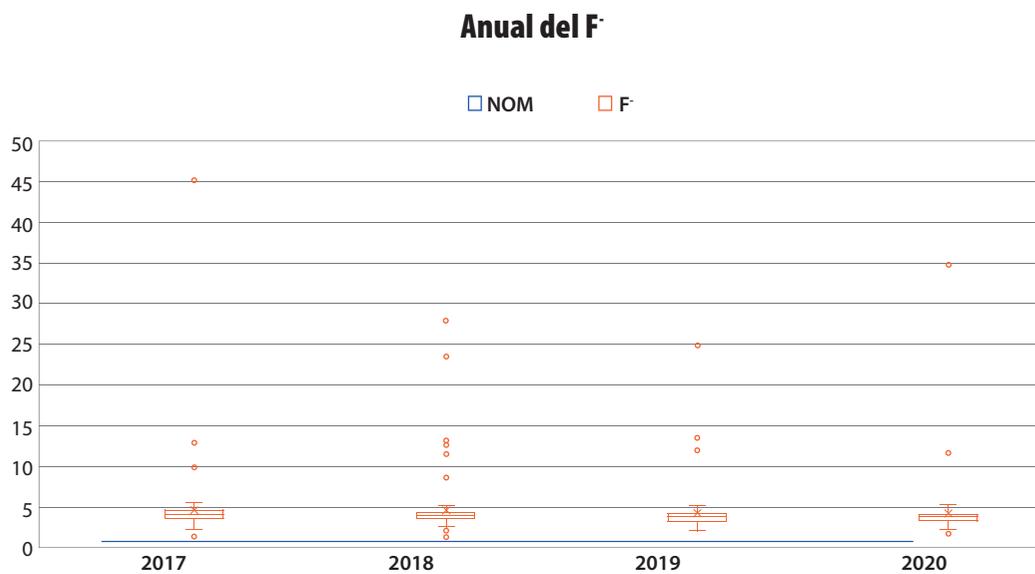
Las gráficas 1 y 2 presentan las concentraciones anuales de As y F⁻ de los 117 pozos durante el pe-

riodo 2017-2020. Para otros parámetros (pH, Fe, Mn, SDT, Cl, dureza como CaCO₃, NO₃ y SO₄), estas se mantuvieron dentro de los límites de la NOM-127-SSAa-2017 (Gutiérrez, 2022).

Gráfica 1



Gráfica 2



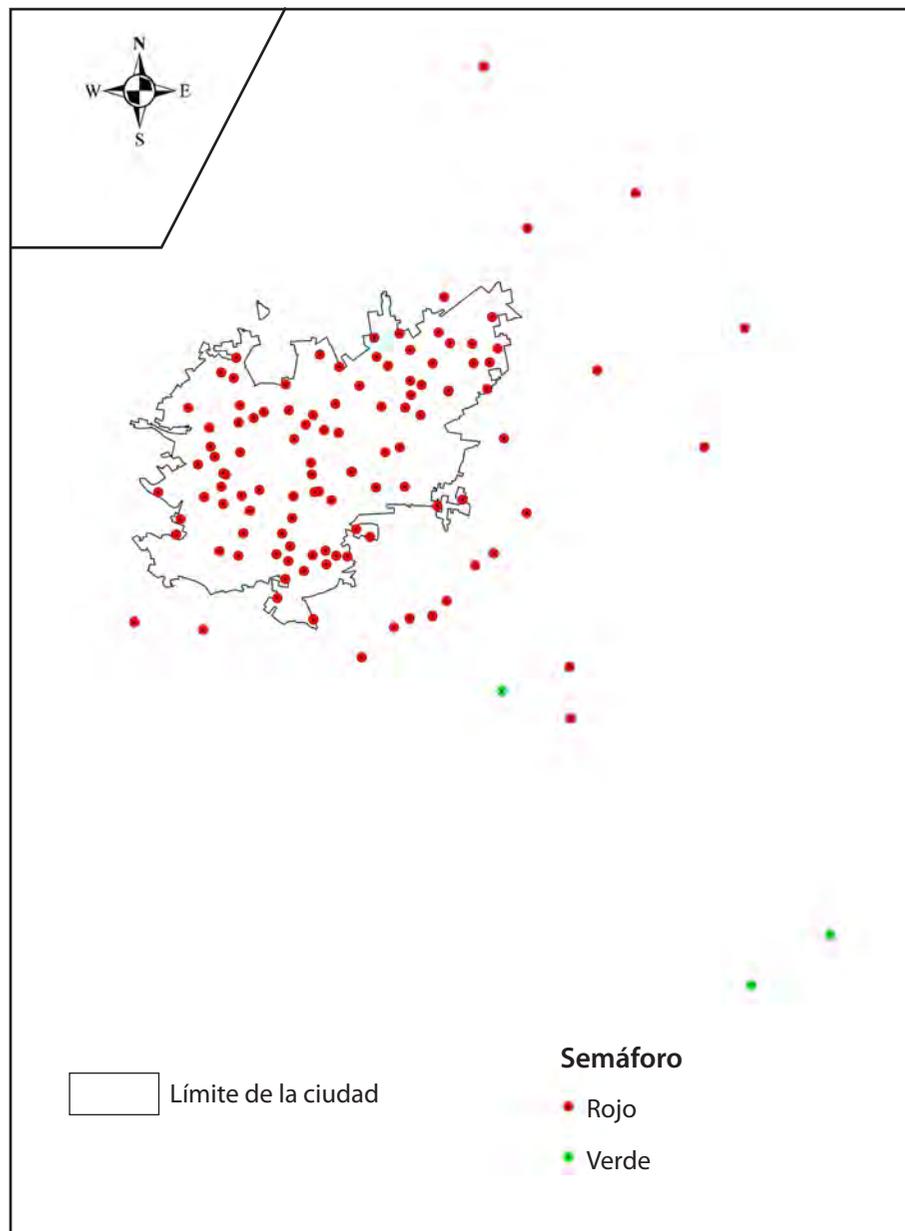
El mapa 10 muestra el semáforo de la calidad del agua, observándose que solo tres pozos de 117 se encuentran en color verde y el resto, en rojo, el cual indica que no cumplen con las recomendaciones oficiales para uso potable.

El ICA se determinó para un total de 101 pozos en el periodo 2017-2020, de los cuales, 97 son del

AMD y cuatro de la CONAGUA. Para las 10 variables, se obtuvieron 5 018 registros en los pozos del AMD y 340 en los de la CONAGUA. El mapa 11 muestra la distribución espacial del ICA, donde se observa que todos los pozos en la ciudad de Victoria de Durango se encuentran en el rango *marginal* y tres de los monitoreados por la CONAGUA, localizados al este y noreste de la urbe, presentan una calidad del agua *pobre*.

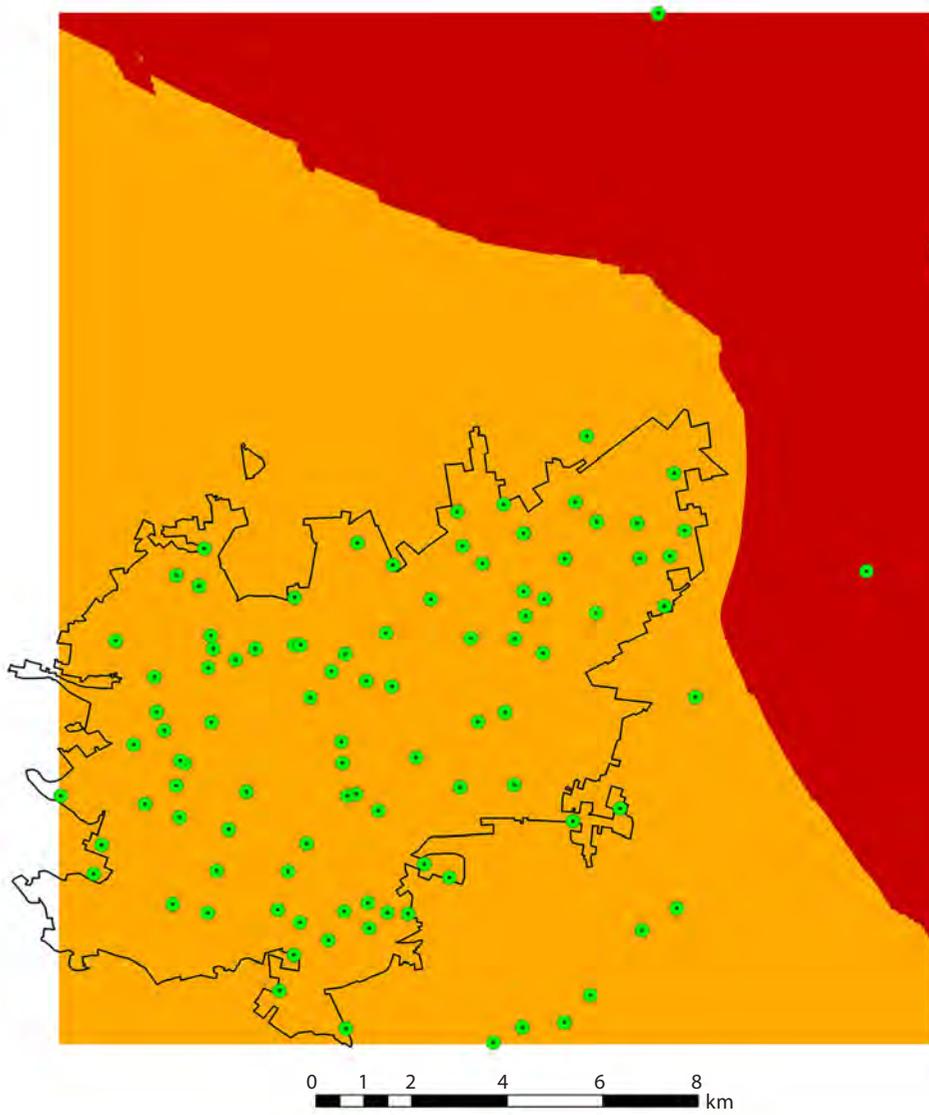
Mapa 10

Semáforo de la calidad del agua

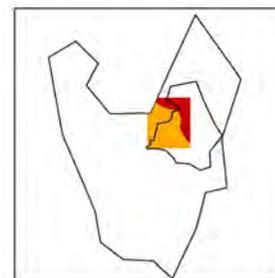


Fuente: Elaboración propia.

Distribución espacial del Índice de la Calidad del Agua



-  Límite de la ciudad
-  Pozos
- CCEM-WQI**
-  Pobre
-  Marginal



Fuente: Elaboración propia.

Factores asociados a la presencia de los contaminantes

Gutiérrez *et al.* (2021) reportan que el origen del As y F⁻ en América Latina es, principalmente, geogénico. Estos se encuentran en zonas con características geológicas similares, como rocas volcánicas ricas en sílice y acuíferos aluviales de formación reciente.

Geoquímica del arsénico y flúor

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica del contenido de As y F⁻ en minerales,

rocas y sedimentos registrados en el acuífero Valle del Guadiana. El cuadro 2 muestra el contenido de As y F⁻ en minerales; el 3 y 4, en rocas; y el 5, el de F⁻ en sedimentos de ríos y arroyos. Los rangos de As en estos últimos que se registran en el acuífero oscilan entre 2.17 y 39.68 mg/kg (SGM, 2017).

Análisis estadístico

La regresión lineal no mostró una correlación significativa entre As y F⁻ con variables piezométricas de profundidad, nivel estático del agua y consumo

Cuadro 2

Contenido de As y F⁻ en minerales

Mineral	As (mg/kg)	Referencia	Mineral	F ⁻ (mg/kg)	Referencia
Olivino	0.075-0.17	Baur & Onishi (1969)	Olivino	0.045	Allmann & Koritnig (1969)
Piroxeno	0.2-0.8		Piroxeno	0.01- 0.034	
Quarzo	0.4-1.3		Plagioclasas	0.069- 0.089	
Plagioclasas	0.8-2.1				
Biotita	1.4				
Magnetita	2.7-41				

Cuadro 3

Contenido de As en rocas basálticas y riolíticas

Rocas	As (mg/kg)	Lugar	Referencia
Basálticas	0.6-1.6	Texas, EE. UU.	Baur & Onishi (1969)
	0.1-6.0	California, Connecticut, Hawái, Idaho, Nuevo México y Oregón, EE. UU.	
	0.18-113	Bangladesh	Bowell <i>et al.</i> (2014)
Riolíticas	0.7-7.5	EE. UU.	Baur & Onishi (1969)
	2.3-504	Chihuahua, México	Reyes <i>et al.</i> (2013)
	0.7-2 100	Gómez Palacio, Durango, México	Ríos (1983)

Cuadro 4

Contenido de F⁻ en rocas basálticas y riolíticas

Rocas	F ⁻ (mg/kg)	Lugar	Referencia
Basálticas	320-340	Hawái, EE. UU.	Allmann y Koritnig (1969)
	180	Islandia	
	280	Japón	
	730	Alemania	
	540	EE. UU.	
	20-1 060, media de 360	EE. UU.	Hayes <i>et al.</i> (2017)
Riolíticas	260-1 080		Allmann y Koritnig (1969)

Cuadro 5

Contenido de F⁻ en sedimentos

Sedimentos	F ⁻ (mg/kg)	Lugar	Referencia
Areniscas	270-290		Allmann y Koritnig (1969)
Calizas	98-940		
Dolomitas	180-390		
Areniscas	10-880, media de 180		Hayes <i>et al.</i> (2017)
Calizas	Por debajo del límite de detección del método hasta 1 210, media de 220		
Cuencas sedimentarias	1.0-7.8	China	Panda <i>et al.</i> (2019)
	0-5.7	Argentina	
	0.01-22.0	Canadá	
	0.05-5.9	EE. UU.	
	0.01-8.9	Alemania	
	1.5-15	Senegal	

de agua ($R^2 = 0.076$ y 0.043 , respectivamente). González (2007) tampoco encontró relación entre los niveles estáticos del agua y As y F⁻ en pozos del municipio de Durango.

Se observó una alta correlación entre As y F⁻ en 117 pozos ($r = 0.84$, $p = 0.000$), la cual indica una dependencia hidrogeoquímica en su liberación. Esta correlación es consistente con estudios previos, los cuales sugieren que la disolución de minerales de origen volcánico es la principal fuente de estos contaminantes en el agua subterránea (Reyes *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2020; Navarro *et al.*, 2017; Ortega, 2009).

El cuadro 6 presenta las correlaciones de Pearson de As y F⁻ con las variables de dureza (CaCO_3), SO_4 , Cl, Fe y As en 99 pozos de la ciudad.

Cuadro 6

Correlaciones en 99 pozos

	CaCO_3	SO_4	Cl	Fe	As
As	-0.489	0.267	-0.517	0.563	
<i>p</i>	0.000	0.004	0.000	0.000	
F ⁻	-0.437	0.297	-0.405	0.655	0.935
<i>p</i>	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000

Se encontró que tanto el As como el F⁻ mantenían correlaciones significativas con el CaCO₃, Cl, SO₄ y Fe, las cuales revelan información importante sobre el origen y las condiciones hidrogeoquímicas del acuífero; Márquez *et al.* (2011) respaldan la conexión del As con el pH, Cl, SO₄ y CaCO₃, indicando que las altas concentraciones de estos aniones en el agua subterránea pueden estar relacionadas con procesos geogénicos. Además, se observaron correlaciones significativas con el Fe, lo cual también ha sido documentado por Gupta y Singh (2018).

Estas correlaciones sugieren que el arsénico y fluoruro están influenciados por factores geogénicos que se deben a la presencia de elementos naturales en rocas, sedimentos, suelos y subsuelo, los cuales se disuelven en el agua superficial y subterránea a través de diversos procesos climatológicos, geológicos e incluso biológicos. El origen geogénico se clasifica en primario y secundario. El primero se refiere a la disolución de la roca original, mientras que el segundo implica que el contaminante es retenido en minerales secundarios, los cuales se forman a partir de la meteorización de la roca original (Gutiérrez *et al.*, 2021).

Conclusiones

El estudio de seguimiento de la presencia de concentraciones elevadas de As y F⁻ en el agua subterránea del acuífero Valle del Guadiana, las cuales superan los límites permisibles de la normativa mexicana. La distribución espacial de estos contaminantes revela áreas de alto riesgo, particularmente al noreste de la ciudad, en localidades como General Lázaro Cárdenas y Colonia Hidalgo. Las correlaciones estadísticas indican que el origen es geogénico debido a la interacción del agua subterránea con rocas ígneas y la disolución de minerales.

La calidad del agua en Durango es una preocupación significativa, ya que todos los pozos de abastecimiento público monitoreados exceden

los límites permisibles para As y F⁻, lo que representa un riesgo para la salud pública.

Es esencial implementar medidas de mitigación para mejorar la calidad del agua y, por ende, proteger a la población. Además, es crucial continuar observando la condición del vital líquido y la distribución espacial de los contaminantes para evaluar la efectividad de las acciones que se tomen para paliar esta problemática.

Fuentes

- Alarcón H., M. T., I. Flores M., P. Romero N., I. R. Martín D. y R. Trejo V. "Contenido de arsénico en el agua potable del Valle del Guadiana, México", en: *Ingeniería Hidráulica en México*. 15 (4), 2001, pp. 63-70.
- Alarcón H., M. T., D. A. Martín A., M. Gutiérrez, L. Reynoso C., A. Martín D., M. A. Olmo M. y J. Bundschuh. "Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization", en: *Science of the Total Environment*. Núm. 698, 2020, p. 8.
- Aranda G., J. J., D. Henry C., L. Ferrari, W. McDowell F. y M. Valencia M. "La evolución volcánotectónica del noroeste de México durante el cenozoico: una sección a lo largo de la autopista MEX 40D a través del campo volcánico de la Sierra Madre Occidental y datos acerca del magmatismo asociado a la extensión en la parte meridional de las provincias tectónicas de Cuencas y Sierras y del Golfo de California", en: *Guía de Excursiones Geológicas de México*. Universidad Autónoma de México y Centro de Geociencias. Núm. 1, edición especial bilingüe, 2015, 82 pp.
- Allmann R. & S. Koritnig. "Fluorine", en: *Handbook of Geochemistry*. Berlin, Springer-Verlag, 1969, pp. 9-D-1-9-D-7.
- Barrientos M., O. A. *Evaluación del impacto de la PTAR Oriente sobre el humedal del Málaga*. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Durango y Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, 2017, 87 pp.
- Baur, W. H. & H. Onishi B. M. "Arsenic", en: *Handbook of Geochemistry*. Berlin, Springer-Verlag, 1969, pp. 33-A-1-33-0-5.
- Borrok D., M., R. M. Lenz, J. E. Jennings, M. L. Gentry, J. Steensma & D. S. Vinson. "The origins of high concentrations of iron, sodium, bicarbonate, and arsenic in the Lower Mississippi River Alluvial Aquifer", en: *Applied Geochemistry*. 98, 2018, pp. 383-392 (DE) doi:10.1016/j.apgeochem.2018.10.01410.1016/j.apgeochem.2018.10.014.
- Bowell R., J., Ch. N. Alpers, H. E. Jamieson & D. K. Nordstrom. "The environmental geochemistry of arsenic – an overview", en: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Mineralogical Society of America*. 79, 2014, pp. 1-16.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *Campo volcánico Durango. Datos abiertos*. Gobierno de México, CENAPRED, 2019.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). "Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 1003 Valle del Guadiana, en el Estado de Durango", en: *Diario Oficial de la Federación*. México, Secretaría de Gobernación, 7 de julio de 2010.
- _____. "Acuerdo General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 12 acuíferos que se indican", en: *Diario Oficial de la Federación*. México, Secretaría de Gobernación, 5 de abril de 2013.
- _____. *Consulta a la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA): aprovechamientos subterráneos*. México, CONAGUA, 2020. (DE) <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>.
- _____. *Calidad del agua en México*. Gobierno de México, CONAGUA, 2021.
- Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME). "CCME water quality index user's manual 2017 update", en: *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. 2017, 23 pp.
- Chávez S., M. J. *Evaluación del riesgo por la presencia de contaminantes en agua destinada al uso y consumo humano del acuífero del Valle del Guadiana*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional, Unidad Durango, 2010, 110 pp.
- González N., C. C. *Cambio de la concentración de arsénico y flúor, en el acuífero Valle del Guadiana y su relación con el nivel estático*. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Durango, 2007, 115 pp.
- Gupta, A. & E. J. Singh. "Arsenic-iron relationships in aquifers of northeast India: Implications for public health and the environment", en: *Environmental Management*. 2018 (DE). doi:10.1007/s00267-018-0999-4.
- Gutiérrez, M., V. M. S Espino, H. M. T. Alarcón, M. A Pinales. y H. H. Silva. "Arsénico y flúor en agua subterránea de Chihuahua: origen, enriquecimiento y tratamientos posibles", en: *Tecnociencia Chihuahua, Revista de Ciencia y Tecnología*. 15 (2), Universidad Autónoma de Chihuahua, 2021, pp. 95-108.
- Gutiérrez R., E. A. *Análisis de la distribución espacial de contaminantes tóxicos inorgánicos en el acuífero Valle del Guadiana*. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Durango, División de Estudios de Posgrado e Investigación, 2022, 150 pp.
- Hayes T., S., M. M. Miller, G. J. Orris & N. M. Piatak. "Fluorine", en: *Chapter G of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. United States Geological Survey, 2017.
- INEGI. *Conjunto de datos vectoriales. Aguas subterráneas. Zona hidrogeológica escala 1:250 000*. México, INEGI, 2008.
- _____. *Censo de Población y Vivienda 2020*. México, INEGI, 2020.
- _____. *Conjunto de datos vectoriales geológicos serie I Durango*. México, INEGI, 1998.
- Machado, I., L. Falchi, V. Bühl & N. Mañay. "Arsenic levels in groundwater and its correlation with relevant inorganic parameters in Uruguay: A medical geology perspective", en: *Science of The Total Environment*. 2020 (DE) doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.13778710.1016/j.scitotenv.2020.137787.
- Márquez, E. B., P. L. Gurian, A. Barud Z. & P. C. Goodell. "Correlates of arsenic mobilization into the groundwater in El Paso, Texas", en: *Air, Soil and Water Research*. 4, 2011, pp. 4-11 (DE) doi: 10.4137/ASWR.56356.
- Martínez C., D. A., M. T. Alarcón H., L. Reynoso C. y L. A. Torres C. Variación espacio-temporal de arsénico y flúor en el agua subterránea de la ciudad de Durango, México, en: *Tecnologías y Ciencias del Agua*. Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2020, 23 pp.
- Martínez P., M. A., M. E. Pérez L., I. Villanueva F. y C. C. González N. "Behavior of arsenic and fluoride concentration in Guadiana Valley Aquifer of Durango, Mexico", en: *Journal of Environmental Protection*. 4, 2013, pp. 14-20.
- Navarro, O., J. González, H. E. Júnez-Ferreira, C.-F. Bautista & A. Cardona. "Correlation of arsenic and fluoride in the groundwater for human consumption in a semiarid region of Mexico", en: *XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis*. 2016.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza. 3, 2008, 394 pp.
- Ortega G., M. 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", en: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 26, 2009, pp. 143-161.
- Panda, B., R. V. Dhanu, S. Chidambaram, M. Arindam, R. Thilagavathi, S. Manikandan & N. Ganesh. "Fluoride contamination in groundwater; a GIS and geostatistics reappraisal", en: *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. 2019, pp 309-322.
- Peter K. M. Megaw & Mark D. Barton. "The Geology & minerals of Cerro de Mercado, Durango, México", en: *Rocks & Minerals*. 74:1, 1999, pp. 20-28 (DE) doi: 10.1080/00357529909602510.
- Reyes G. V. M., M. T. Alarcón H., M. Gutiérrez, D. Núñez L. "Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: contaminant levels, potential sources, and co-occurrence", en: *Water Air Soil Pollut*. 224(2), 2013.
- Reyes C. Y., I. Vergara, E. O. Torres, M. Días y E. E. González. "Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria", en: *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. 16(2), 2016, pp. 66-77.

- Ríos, G. R. 1988. *Mineralogía y geoquímica del arsénico al noreste de Gómez Palacio, Durango*. Tesis de Maestría. México, D. F., Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 1983, 59 pp.
- Rovira M., J. J., J. M. González J., F. Gervilla L., V. Colás G., M. G. Dávalos E. & J. Aranda. "Petrogénesis de enclaves ultramáficos del manto subcontinental del volcán La Breña (campo volcánico de Durango, México)", en: *Sociedad Española de Mineralogía*. 24, 2019.
- Secretaría de Salud *et al.* "Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", en: *Diario Oficial de la Federación*. México, Secretaría de Gobernación, 6 de diciembre de 2019.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). *Carta geoquímica de la República Mexicana escala 1:250 000*. México, SGM. Datos abiertos. Gobierno de México, 2017.
- Van Dao, U. Wilhelm & B. H. Subhendu. "Introducing the modification of Canadian Water Quality Index", en: *Groundwater for Sustainable Development*. 11, 6, 2020.
- Varol, S., Şener & E. Şener. "Assessment of groundwater quality and human health risk related to arsenic using index methods and GIS: A case of Şuhut Plain (Afyonkarahisar/Turkey)", en: *Environmental Research*. 202, 2021.