

Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo

Water Quality and Distribution in the Southern Region of the Aquifer of the Mezquital Valley, Hidalgo

Liliana Téllez Peña¹, José Luis Expósito Castillo^{1*}, Reyna María Guadalupe Fonseca Montes de Oca¹ y María Vicenta Esteller Alberich¹

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. C.P. 50200, Itelles345@gmail.com, jlexpositoc@uaemex.mx, mgfonsecam@uaemex.mx, mvestellera@uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0001-1865-7161>, <https://orcid.org/0000-0002-5026-9302>, <https://orcid.org/0000-0001-6505-8252>, <https://orcid.org/0000-0002-5832-8741>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 17/09/2025. Aceptado: 20/12/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Téllez Peña, L., Expósito Castillo, J. L., Fonseca Montes de Oca, R. M. G. y Esteller Alberich, M. V. (2026). Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Geografía Aplicada*, 2(1), 1-25.

Resumen

La calidad del agua subterránea se ha visto comprometida por factores ambientales, industriales y geológicos, lo que hace necesaria una evaluación sistemática, en especial cuando esta se destina al uso y consumo humano (Instituto del agua, 2024). Bajo este

marco, el objetivo principal de la investigación fue evaluar la calidad del agua subterránea destinada al uso y consumo humano mediante el índice GWQI y analizar su distribución espacial en función de las condiciones hidrogeológicas del sur del acuífero del Valle del mezquital.

La metodología consistió en la aplicación del Índice de calidad del agua subterránea (GWQI), complementada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) lo que permitió integrar y representar espacialmente los resultados de parámetros fisicoquímicos, comparando estos datos con las concentraciones máximas permitidas según la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). Se analizaron un total de 19 muestras de agua provenientes de pozos, en las cuales se determinaron concentraciones de sulfatos, sólidos disueltos totales, pH, arsénico, hierro, flúor y nitratos.

Se generó una escala cualitativa para los resultados lo que indica que el 11 % de las muestras se encuentran en condiciones pésimas, el 10 % en mala calidad, el 37 % requiere tratamiento indispensable, el 26 % necesita tratamiento y el 16% puede considerarse de excelente calidad. Estos hallazgos constituyen una base técnica fundamental para el diseño de redes de monitoreo y la implementación de medidas de gestión orientadas a garantizar la seguridad del recurso hídrico y la salud pública mediante la implementación de estrategias de protección para los pozos de explotación.

Palabras clave: calidad del agua, índice GWQI, pozos, explotación, acuífero.

Abstract

Groundwater quality has been compromised by environmental, industrial, and geological factors, making a systematic evaluation necessary, especially when the water is intended for human use and consumption (Water Institute, 2024). Within this framework, the main objective of this research was to evaluate the quality of groundwater intended for human use and consumption using the Groundwater Quality Index (GWQI) and to analyze its spatial

distribution based on the hydrogeological conditions of the southern part of the Mezquital Valley aquifer.

The methodology consisted of applying the Groundwater Quality Index (GWQI), supplemented with Geographic Information System (GIS) tools, which allowed for the integration and spatial representation of the results of physicochemical parameters, comparing these data with the maximum permitted concentrations according to NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). A total of 19 groundwater samples collected from wells were analyzed, determining concentrations of sulfates, total dissolved solids, pH, arsenic, iron, fluoride, and nitrates.

The results showed that 11% of the samples were in poor condition, 10% in bad quality, 37% required essential treatment, 26% needed treatment, and 16% could be considered of excellent quality. These findings provide a fundamental technical basis for designing monitoring networks and implementing management measures aimed at ensuring the safety of the water resource and public health through the implementation of protection strategies for exploitation wells

Keywords: groundwater quality, GWQI Index, wells, exploitation, aquifer.

1. Introducción

La gestión del agua subterránea enfrenta desafíos significativos tanto en términos de cantidad como de calidad. Una administración adecuada no se limita únicamente a su extracción y consumo sino que también exige un monitoreo continuo de la calidad, considerando tanto la contaminación de origen natural como la provocada por actividades humanas (IMTA, 2022). Entre los principales factores de degradación destacan la minería, el uso de agroquímicos, las actividades industriales, la descarga de aguas residuales y la sobreexplotación de los acuíferos. Por ello, resulta indispensable establecer programas permanentes de monitoreo que permitan identificar oportunamente la presencia de contaminantes y orientar acciones de gestión para la preservación del recurso.

La contaminación de las aguas subterráneas constituye un factor determinante en la propagación de enfermedades. Los efectos sobre la salud se relacionan principalmente con la exposición prolongada a agentes patógenos, toxinas y compuestos químicos presentes en el recurso hídrico. La presencia de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos, tales como: fluoruro, arsénico, hierro y manganeso, entre otros, puede generar una amplia variedad de afecciones, que van desde fluorosis dental y lesiones dérmicas hasta un incremento en el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas, incluidos ciertos tipos de cáncer, cuando la exposición persiste durante periodos prolongados (UNESCO, 2020).

El acuífero del Valle del Mezquital constituye uno de los sistemas hidrogeológicos más relevantes del estado de Hidalgo, por su extensión territorial y su papel en el abastecimiento de agua para actividades agrícolas y usos locales. Este acuífero se caracteriza por una dinámica de recarga fuertemente influenciada por la irrigación con aguas residuales, lo que lo convierte en un sistema particularmente vulnerable a procesos de contaminación (Hernández, 2023).

Este sistema hidrogeológico recibe aportes considerables de aguas residuales, una parte de dichos aportes proviene de aguas residuales tratadas descargadas por la Planta de Tratamiento de Atotonilco, mientras que otra fracción corresponde a aguas residuales sin tratamiento procedentes de la Ciudad de México y administradas por el organismo Aguas del Valle de México.

La infiltración constituye el principal mecanismo de recarga del acuífero, proceso favorecido por las prácticas de riego agrícola mediante canales principales y laterales, así como por los retornos de riego. La ausencia de revestimiento en estos canales incrementa sustancialmente la infiltración hacia el subsuelo y, en consecuencia, la incorporación significativa de aguas residuales al acuífero (Lesser-Carrillo et al., 2011).

La problemática relacionada con la disposición del agua subterránea en la región sur del acuífero del valle del Mezquital está estrechamente vinculada al incremento de fuentes

potenciales de contaminación, entre ellas las actividades agrícolas e industriales, los depósitos de residuos sólidos y la descarga de aguas residuales. Estas fuentes representan un riesgo significativo para la integridad del recurso hídrico, ya que contribuyen de manera directa a su deterioro. Como consecuencia, en distintas áreas del acuífero se han detectado concentraciones que superan los valores máximos permitidos conforme a la normatividad establecida para agua destinada al uso y consumo, particularmente en parámetros como sodio, sólidos disueltos totales, fluoruros, arsénico, plomo y coliformes fecales (Lesser-Carrillo et al., 2011).

En este contexto, el propósito de la investigación fue evaluar la calidad del agua subterránea mediante la aplicación del índice GWQI y analizar su distribución espacial en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Para ello, se emplearon herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilitan la representación y el análisis espacial de los parámetros fisicoquímicos presentes en el recurso hídrico.

2. Metodología

2.1. Caracterización del área de estudio

El acuífero del Valle del Mezquital (Figura 1) tiene una extensión aproximada de 2 714 km² y se sitúa en la parte centro-sur del estado de Hidalgo, entre los paralelos 19°30' y 20°22' de latitud norte y los meridianos 98°56' y 99°37' de longitud oeste. Limita al norte con los acuíferos Ixquimilpan y Chapantongo-Alfajayucan; al este con Actopan-Santiago de Anaya y Ajacuba; al sur con Tepeji del Río; y al noroeste con Huichapan-Tecoautla, todos ellos ubicados en el estado de Hidalgo. Hacia el sureste colinda con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al suroeste con Ixtlahuaca-Atlacomulco y al oeste con Polotitlán, estos últimos pertenecientes al Estado de México (CONAGUA, 2024b).

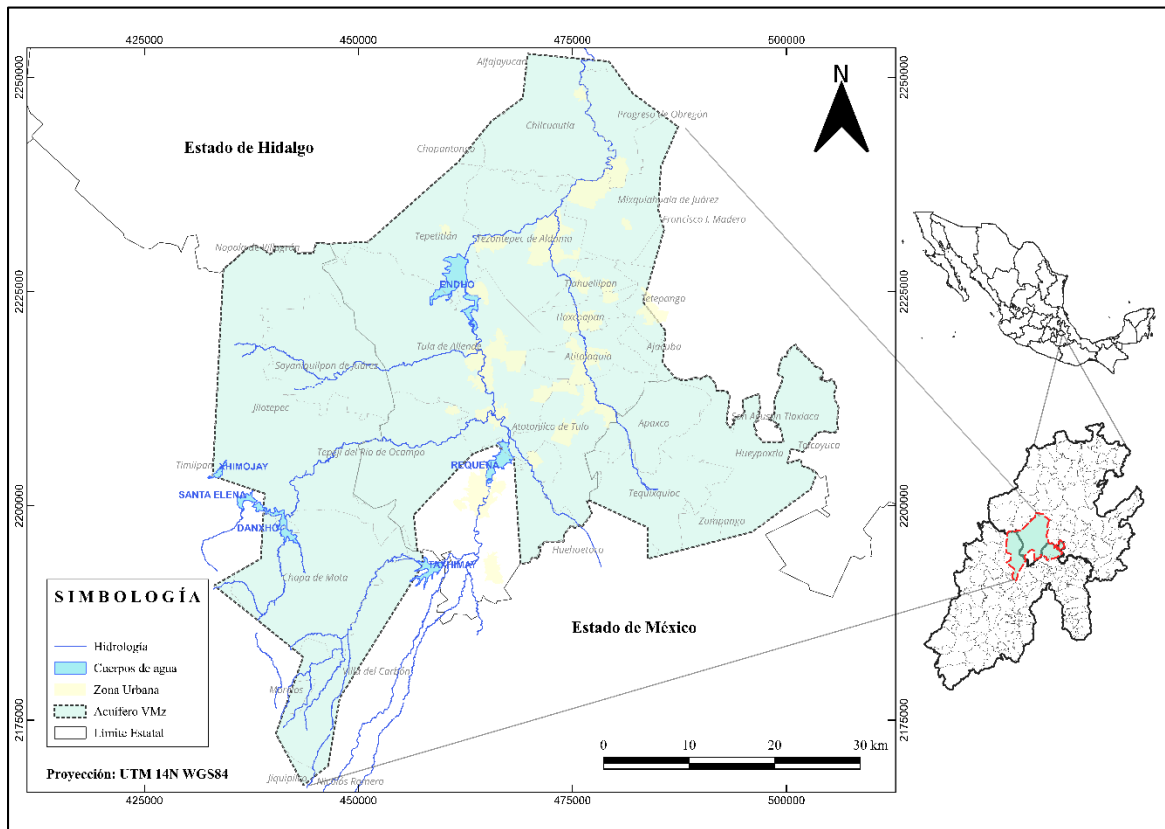


Figura 1. Mapa de ubicación del sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en información de CONAGUA (2023) y CONABIO (2023).

La zona sur del acuífero del Valle del Mezquital se ubica en una región caracterizada por la presencia de valles fluviales, aluviales y lacustres, al encontrarse entre dos subprovincias fisiográficas: Lagos y Volcanes de Anáhuac. Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), el área de estudio presenta dos tipos de clima: semiárido estepario cálido (BS1kw) y templado subhúmedo con verano fresco (C(w0)), ambos con un régimen de lluvias en verano (INEGI, 2021). La precipitación media anual es de aproximadamente 500 mm, mientras que la temperatura media anual oscila entre 8 °C y 16 °C (CONAGUA, 2023).

Hidrológicamente, la zona sur se localiza dentro de la Región Hidrológica 26 Pánuco, específicamente en la Subregión Hidrológica del río Tula, que integra la cuenca del río Moctezuma. La corriente principal es el río Tula, el cual recorre aproximadamente 6,551 km² antes de unirse con el río Tepeji en las estribaciones de la Sierra de la Catedral.

En cuanto al uso de suelo, el área de estudio presenta una distribución espacial heterogénea conformada por zonas urbanas, áreas de bosque denso y poco denso, cuerpos de agua, agricultura de riego y de temporal, minas en erosión, industrias, minas a cielo abierto y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Desde el punto de vista geológico, el Valle del Mezquital está dominado por unidades de origen volcánico, asociadas a un ambiente geotectónico característico de un arco continental. Asimismo, se observan afloramientos de rocas sedimentarias correspondientes al Cretácico. En el contexto geotectónico, la zona de estudio se encuentra relacionada con procesos orogénicos vinculados a la Sierra Madre Oriental (CONAGUA, 2023).

La hidrogeología del acuífero del Valle del Mezquital (Figura 2) está conformada por secuencias marinas detríticas y calcáreas, intercaladas con valles fluviales y llanuras originadas en antiguas cuencas lacustres. Bajo estas condiciones, el acuífero se clasifica como libre a semiconfinado, debido a la presencia de depósitos lacustres. Dichos depósitos, por su alto grado de compactación, actúan como estratos prácticamente impermeables que limitan la infiltración y el flujo de agua subterránea (CONAGUA, 2024b).

En la zona sur del acuífero del Valle del Mezquital se concentra un número considerable de pozos de extracción. Sin embargo, para los fines de esta investigación se seleccionaron y muestrearon únicamente 19 pozos destinados al consumo humano (Tabla 1), distribuidos en cuatro municipios: Apaxco, en el Estado de México, y Atotonilco de Tula, Atitalaquia y Tula de Allende, en Hidalgo.

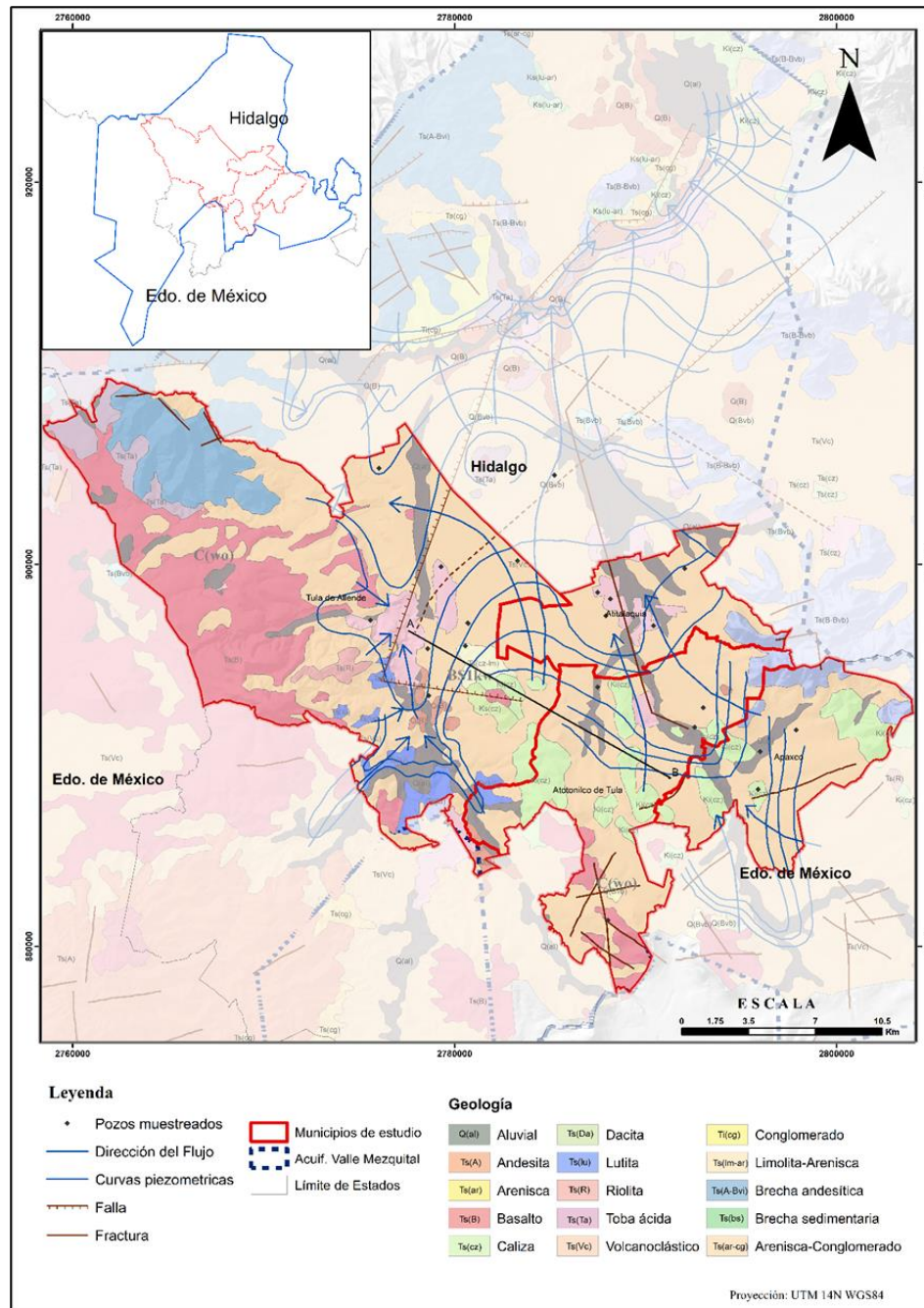


Figura 2. Mapa hidrogeológico del sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en información tomada de CONABIO (2023).

Tabla 1. Pozos identificados en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital.

Municipio Tula de Allende	Municipio Atitalaquia	Municipio Atotonilco de Tula	Municipio Apaxco
MZ-39	MZ-60	P-07	AP-01
MZ-68	MZ-104	MZ-89	AP-05
MZ-80	MZ-106	MZ-326	MZ-360
MZ-82	MZ-110	-	-
MZ-161	MZ-111	-	-
MZ-225	MZ-312	-	-
CN-2	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

2.2. Método

Para el desarrollo de la presente investigación se establecieron cuatro etapas metodológicas sintetizadas en la figura 3. Dichas etapas permitieron caracterizar el área de estudio y la aplicar el índice GWQI, con el fin de evaluar la calidad del recurso hídrico y, a partir de ello, proponer medidas de gestión adecuadas.

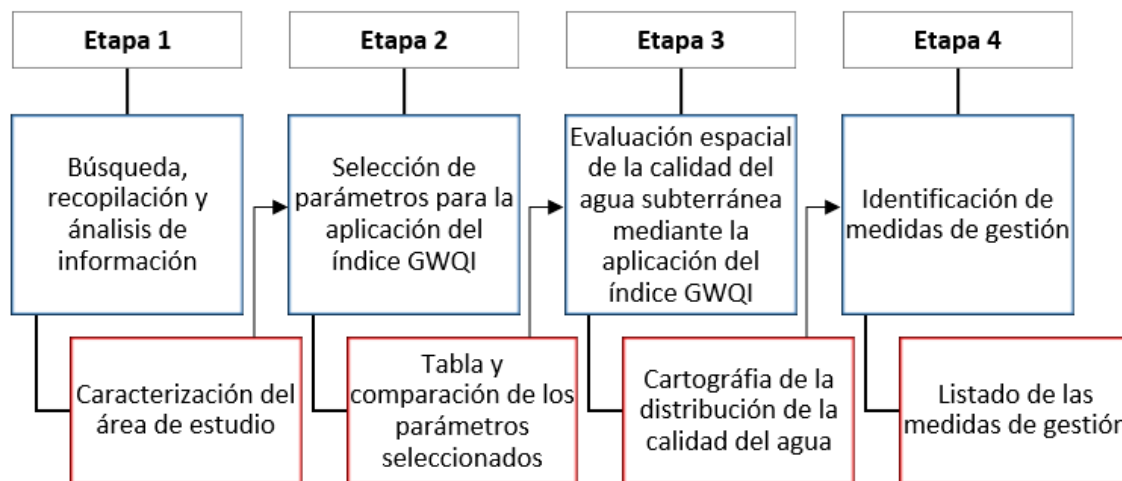


Figura 3. Diagrama metodológico.

Fuente: elaboración propia.

Etapas 1. Búsqueda, recopilación y revisión de la información disponible

En esta primera etapa se analizaron datos climatológicos, edafológicos, geológicos, hidrogeológicos, de uso de suelo y topográficos. Además, se consultaron diversas fuentes bibliográficas, entre ellas libros, revistas académicas y artículos científicos relacionados con indicadores de calidad del agua e hidrogeología, con el propósito de integrar una geobase sólida y elaborar la cartografía requerida.

Etapas 2. Selección de parámetros para la aplicación del índice GWQI

Para la ejecución de la etapa 2 fue indispensable realizar una selección de los parámetros que servirían como base para la aplicación del índice GWQI. Esta selección se sustentó en dos criterios principales: 1) el cumplimiento de la normatividad establecida “NOM-127-SSA1-2021”, relativa a la calidad del agua para uso y consumo humano, y 2) el riesgo que los parámetros fisicoquímicos figuran para la salud del ser humano al encontrarse presentes en las matrices ambientales, particularmente en el agua.

Con este propósito, se analizaron 30 parámetros (mayoritarios, minoritarios y traza) obtenidos durante la segunda etapa del proyecto Pronaii 318998, *“Evaluación de riesgo para la salud humana y ambiental por agentes tóxicos de origen antrópico como herramienta de empoderamiento social. Región Estratégica Ambiental Norte del Estado de México y Zona Tula, Hidalgo”*.

A partir de la base de datos, se seleccionaron los parámetros que cumplen con los siguientes criterios:

- Están contemplados en la NOM-127-SSA1-2021.
- Representan un riesgo potencial para la salud según su toxicidad, como es el caso de metales pesados, arsénico, plomo y fluoruro.
- Presentaron concentraciones relevantes en los pozos muestreados, lo que justifica su inclusión en el índice para reflejar con mayor exactitud el estado del agua.

Etapa 3. Evaluación espacial de la calidad del agua subterránea a través de la aplicación del índice GWQI.

Con base en los criterios establecidos en la etapa previa, se seleccionaron siete parámetros clave para evaluar la calidad del agua, considerando los límites definidos en la normatividad NOM-127-SSA1-2021. Para facilitar la interpretación de los resultados (Tabla 2), se diseñó un sistema de clasificación cualitativa, en el cual a cada parámetro se le asignó un color distintivo según su grado de cumplimiento con la norma.

Tabla 2. Clasificación cualitativa para la interpretación de resultados.

Color	Cumplimiento de la Norma
Verde	Concentraciones dentro del límite máximo permisible
Rojo	Concentraciones que exceden y se encuentran por debajo del límite máximo permisible

Fuente: elaboración propia.

La clasificación previamente descrita permitió generar mapas temáticos individuales para cada uno de los parámetros seleccionados, lo que a su vez facilitó la visualización de la distribución espacial de la calidad del agua por componente. Concluida esta etapa, se aplicó el índice GWQI, siguiendo la metodología propuesta por (Saeedi et al., 2010), y adaptada a las condiciones hidrogeológicas y normativas locales. Este índice ofrece una evaluación integral sobre la idoneidad del agua para consumo humano en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tula de Allende y Apaxco.

Para el cálculo del GWQI se consideraron los siguientes parámetros: sulfatos, sólidos disueltos totales (SDT), pH, arsénico (As), hierro (Fe), fluoruro (F^-) y nitratos (NO_3^-). A cada parámetro se le asignó un peso ponderado (w_i) en función de su importancia relativa, determinado mediante la consulta a un panel de expertos en hidrogeoquímica e hidrogeología. Con base en estas evaluaciones, se estableció una escala de ponderación de 1 a 5, donde 1 corresponde a baja importancia y 5 a alta importancia. Finalmente, el peso

asignado a cada parámetro se definió aplicando la moda estadística, es decir, seleccionando el valor más frecuente entre las opiniones de los expertos.

Con base en las evaluaciones realizadas, se asignaron valores de peso ponderado en grado de 1 a 5, indicando que 1 es baja importancia y 5 alta importancia. Para determinar el peso final de cada parámetro se aplicó la medida estadística de la moda, seleccionando el valor más frecuente entre las calificaciones otorgadas por un grupo de expertos.

Posteriormente, se procedió a calcular el peso relativo (W_i) mediante el método del índice aritmético ponderado, el cual consiste en dividir el peso asignado a cada parámetro (w_i) entre la suma total de los pesos ponderados de todos los parámetros considerados. La formulación matemática de este procedimiento se muestra en la Ecuación 1.

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

Posteriormente, se determinó la calificación de calidad (Q_i) de cada parámetro. Este indicador se obtuvo al dividir la concentración medida en laboratorio para cada muestra de agua (C_i) entre el valor máximo permitido por la NOM-127-SSA1-2021 para agua de consumo humano (S_i), y multiplicar dicho cociente por 100, conforme a lo establecido en la ecuación 2.

$$Q_i = (C_i / S_i) * 100 \quad (2)$$

Una vez determinados los valores de W_i y Q_i , se procedió a calcular el subíndice del i -ésimo parámetro (SI_i), el cual refleja la contribución individual de cada parámetro a la calidad del agua. Dicho subíndice se obtiene mediante la multiplicación del peso relativo (W_i) por la calificación de calidad (Q_i), conforme a lo establecido en la ecuación 3.

$$SI_i = W_i * Q_i \quad (3)$$

Finalmente se calcula el índice GWQI, mediante la suma de los subíndices de todos los parámetros analizados en la muestra, de acuerdo con la ecuación 4.

$$GWQI = \sum SI_i \quad (4)$$

Cabe señalar que el valor obtenido del índice permite clasificar la calidad del agua en relación con su idoneidad para el consumo humano. Esta clasificación se establece en cinco categorías: excelente, buena, regular, mala y pésima, de acuerdo con los rangos numéricos presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del rango del índice GWQI y categoría del agua.

Colores	Rangos	GWQI
	<50	Excelente
	50-100	Buena
	100-200	Regular
	200-300	Mala
	>300	Pésima

Fuente: elaboración propia con base en información de (Griffa et al., 2023).

Los valores obtenidos para cada muestra corresponden a los diferentes pozos ubicados en el área de estudio. Posteriormente, los resultados fueron integrados en un sistema cartográfico mediante los softwares QGIS y ArcGIS, lo que permitió representar de manera espacial la distribución de la calidad del agua subterránea en los municipios analizados.

Etapla 4. Identificación de medidas de gestión.

En la etapa final se formularon medidas de gestión basadas en la clasificación obtenida para cada pozo, lo que permitió establecer acciones de protección y alertar oportunamente a la población. Además, esta información constituyó un insumo fundamental para que las autoridades ambientales y especialistas en salud publica puedan tomar decisiones adecuadas.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos ofrecen información clave que permite a los tomadores de decisiones diseñar y proponer estrategias de gestión y prevención en el uso del agua.

Etapa 1. Búsqueda, recopilación y revisión de la información disponible

La primera etapa permitió establecer un marco conceptual, aplicar las características del área de estudio y realizar un análisis de las fuentes consultadas, con el fin de orientar la implementación de la investigación (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del análisis de las fuentes de información.

Fuente	Insumo	Uso
UNAM, CONAGUA, ONU, IITCA, CONABIO, INEGI, IGCEM, TerraClimate	Se obtuvo información de los parámetros fisicoquímicos del agua, mayoritarios y minoritarios	Permitió conformar la geobase
CONABIO, INEGI, Servicio Geológico Mexicano, CONAGUA, USGS	Se obtuvieron las capas Shape de ubicación, hidrología geología, clima, y edafología	Permitió realizar la cartografía de la zona de estudio y comprender su funcionamiento

Fuente: elaboración propia.

Etapa 2. Selección de parámetros para la aplicación del índice GWQI

Los parámetros de análisis se seleccionaron en base en los límites establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021 y en el nivel de riesgo que representan los elementos presentes en la matriz ambiental (agua) para la salud humana (Tabla 5).

Tabla 5. Selección de parámetros fisicoquímicos.

Parámetros	Límite permisible NOM-127-SSA-2021	Parámetros	Límite permisible NOM-127-SSA-2021
Sulfatos	400 mg/L	Hierro	0.30 mg/L
SDT	1000 mg/L	Flúor	1.50 mg/L
pH	6.5-8.5	Manganeso	0.15 mg/L
Aluminio	0.20 mg/L	Mercurio	0.006 mg/L
Arsénico	0.025 mg/L	Plomo	0.01 mg/L
Cadmio	0.005 mg/L	Nitrógeno de nitritos	0.90 mg/L
Cobre	2.00 mg/L	Nitrógeno de nitratos	11.0 mg/L

Fuente: elaboración propia.

Etapa 3. Evaluación espacial de la calidad del agua subterránea a través de la aplicación del índice GWQI

Una vez seleccionados los parámetros a analizar se elaboró la tabla 6 con el propósito de identificar y visualizar los parámetros cuya concentración excede los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

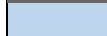
Tabla 6. Clasificación de los parámetros fisicoquímicos con base en los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021

Clave	Nombre	SDT	pH	Sulfatos	Arsénico	Hierro	Flúor	N-Nitrato
Unidad de medida		(mg/L)		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
AP-01	Pozo Bicentenario	372	7.6	14.3	ND	ND	0.53	3.4
AP-05	Pozo Tepetates	476	7.6	36.05	ND	ND	0.44	6.87
CN-2	Manantial Damu	942	7.1	102.89	0.19	0.01	1.37	15.52
MZ-39	Pozo Teocalco	1690	6.9	384.46	0.03	ND	0.41	21.11
MZ-60	Cerro Colorado	1302	6.9	210.28	0.02	ND	0.83	21.29
MZ-68	Pozo Insurgentes	1762	6.9	526.88	0.33	ND	1.81	13.5
MZ-80	Pozo Iturbe	1710	6.9	531.63	0.09	ND	1.04	12.26
MZ-82	Pozo Montecillo	898	6.9	92.93	0.2	ND	1.53	12.6
MZ-89	Pozo Progreso	1652	7.8	716.5	0.03	ND	0.8	6.27
MZ-104	Pozo El 18 De marzo	1720	7	819.05	0.09	0.02	1.52	5.34
MZ-106	Pozo El Tablón	1492	6.8	113.82	0.09	0.06	0.93	22.59
MZ-110	Pozo Dendho	2248	6.8	1054.11	0.09	0.01	1.19	9.6
MZ-111	Pozo Colonia Dedhó	1590	6.9	784.21	0.04	0.01	1.13	10.42
MZ-161	Pozo Manzanitas 1	944	7.1	270.54	ND	ND	0.62	12.18
MZ-225	Pozo Santa Ana Ahuehuepan (Bp100)	1102	7.2	183.98	ND	ND	0.71	20.02
MZ-312	Pozo Bojayito/1 Tlaxcoapan	1556	6.8	96.4	ND	0.02	0.25	24.79
MZ-326	Pozo El Refugio	1874	6.7	609.04	0.12	0.04	0.9	16.12
MZ-360	Pozo La Melga	786	7.1	215.93	0.11	ND	0.61	0.32
POZO-07	Pozo La Toscana	3600	6.3	1655.8	0.6	ND	2.63	0.28
Límite Máximo permisible de la NOM-127-SSA1-2021		1000	6.5-8.5	400	400	0.30	1.50	11.00

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se calculó el índice GWQI, el cual permitió asignar a cada pozo un color representativo según el valor obtenido. Esta clasificación facilitó la interpretación de la idoneidad del agua para consumo humano, conforme a los criterios establecidos en la tabla 7.

Tabla 7. Color según la idoneidad del agua para consumo humano.

Color	Rango	Significado
	<50	No requiere una purificación para su consumo.
	50-100	Agua con calidad aceptable (requiere una purificación mínima).
	100-200	Agua con calidad regular que podría presentar posibles riesgos a la salud (requiere un indispensable tratamiento de potabilización).
	200-300	Agua de calidad deficiente (presenta riesgo para la salud y no es recomendable para consumo humano).
	>300	Agua con una calidad pésima calidad (no es apta para el consumo humano).

Fuente: elaboración propia con base en información de Saeedi et al., 2010.

La tabla 8 muestra los resultados de la clasificación de la calidad del agua de los pozos analizados mediante el índice GWQI, asignándose un color a cada sitio conforme a los rangos establecidos en la tabla 7. Los resultados indican que en tres pozos (Bicentenario, Tepetates y Manzanitas 1) el agua es apta para consumo directo, sin requerir tratamiento adicional. En cinco pozos (Teocalco, Manantial Cerro Colorado, Progreso, Santa Ana Ahuehuepan y Bojayito), la calidad del agua se clasifica como buena, aunque se recomienda un proceso de purificación previo a su consumo.

En siete pozos (Iturbide, 18 de Marzo, El Tablón, Dendhó, Colonia Dendhó, El Refugio y La Melga) la calidad se considera regular, por lo que se requiere tratamiento indispensable antes de su uso. En dos sitios (Manantial Damu y Montecillo), el agua presenta una calidad mala, lo que representa un riesgo para la salud. Finalmente, en dos pozos (Insurgentes y La Toscana), la calidad del agua es pésima, por lo que no se considera apta para el consumo humano bajo ninguna circunstancia.

Una vez definidos los rangos por color, se procedió a calcular el porcentaje de muestras en función de los valores obtenidos del Índice de Calidad del Agua Subterránea (GWQI). En la figura 4 se observa la distribución porcentual de la calidad del recurso hídrico. Del total de pozos muestreados, el 16% presentó una calidad excelente, representada con tonalidad azul; el 26% mostró una calidad buena, asociada al color verde; mientras que el 37% se clasificó con condiciones regulares, identificadas con el tono amarillo. Por otro lado, el 10%

evidenció una calidad mala, correspondiente al color naranja, y el 11% restante reflejó una calidad pésima, representada en rojo.

Tabla 8. Clasificación del índice GWQI de acuerdo con los parámetros analizados.

GWQI	Nombre	Total
AP-01	Pozo Bicentenario	19.82
AP-05	Pozo Tepetates	25.38
CN-2	Manantial Damu	219.32
MZ-39	Pozo Teocalco	93.84
MZ-60	Cerro Colorado	81.29
MZ-68	Pozo Insurgentes	353.91
MZ-80	Pozo Iturbe	141.89
MZ-82	Pozo Montecillo	218.73
MZ-89	Pozo Progreso	89.32
MZ-104	Pozo El 18 De Marzo	162.52
MZ-106	Pozo El Tablón	172.89
MZ-110	Pozo Dendho	168.88
MZ-111	Pozo Colonia Dedhó	112.38
MZ-161	Pozo Manzanitas 1	46.94
MZ-225	Pozo Santa Ana Ahuehuepan (Bp100)	58.71
MZ-312	Pozo Bojayito/1 Tlaxcoapan	69.41
MZ-326	Pozo El Refugio	196.24
MZ-360	Pozo La Melga	119.68
AP-01	Pozo La Toscana	623.33

Fuente: elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

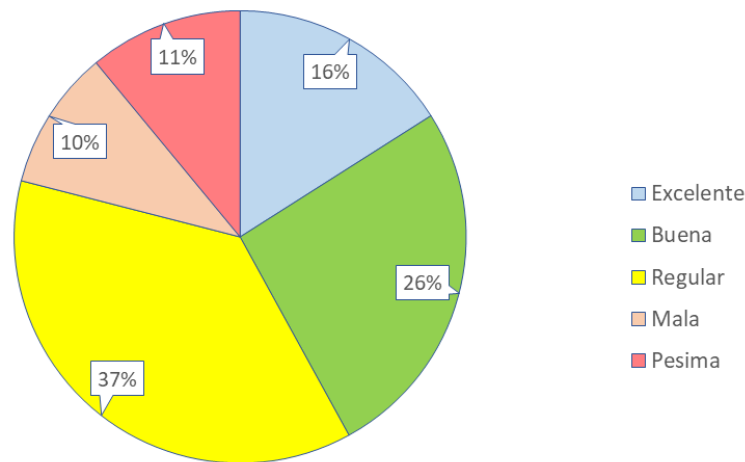


Figura 4. Distribución porcentual de los pozos según los rangos de clasificación del índice GWQI en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el 58% de los pozos muestreados presentan una calidad clasificada como regular, mala o pésima, lo que demuestra que no son aptos para el consumo humano sin un tratamiento previo adecuado. En la figura 5 se muestran los 19 pozos evaluados y su clasificación conforme al índice GWQI, evidenciándose diferencias significativas en la calidad del agua, aun cuando todos se localizan dentro de la zona urbana. En particular, el pozo-07, localizado en el municipio de Atotonilco de Tula, y el pozo MZ-68, ubicado en el municipio de Tula de Allende, registraron una calidad pésima, ya que cinco de los siete parámetros analizados (sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico, flúor y nitratos) excedieron los límites establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021. En consecuencia, el recurso hídrico de estos pozos no puede destinarse al consumo humano.

Por otro lado, también se identificaron pozos con excelente calidad para los parámetros evaluados, principalmente en zonas del municipio de Apaxco y en algunas áreas de Tula de Allende. Asimismo, se observó que pozos con calidad buena, regular y mala se distribuyen a lo largo de los cuatro municipios estudiados, lo que refuerza la necesidad de implementar procesos de potabilización que garanticen un uso seguro del recurso.

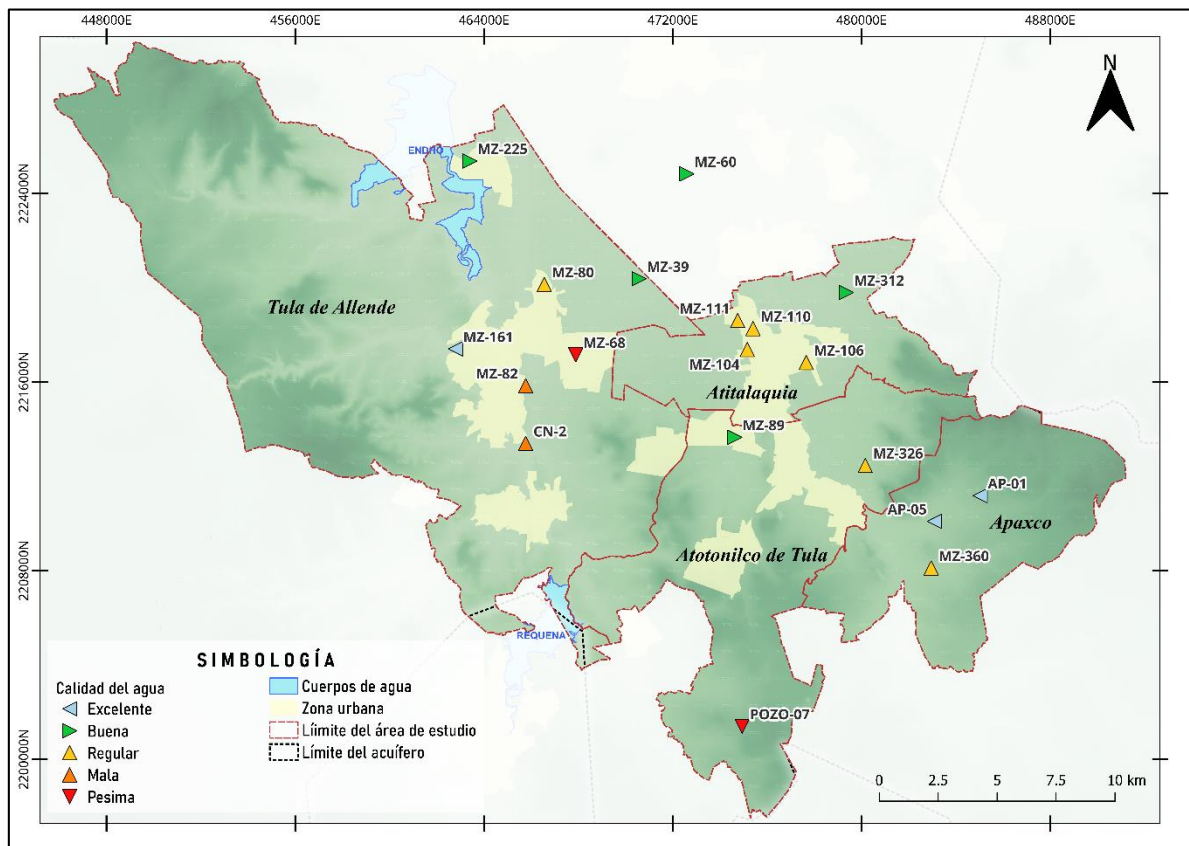


Figura 5. Mapa de la clasificación de la calidad del agua subterránea.

Fuente: elaboración propia.

Etapas 4. Identificación de medidas de gestión

Algunas de las principales medidas para el control y mitigación de la contaminación del agua subterránea son:

- **Monitoreo regular:** Establecer un control constante de la calidad del agua en los puntos más críticos, a fin de detectar de manera temprana las fuentes de contaminación y atenderlas oportunamente.
- **Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Aplicar herramientas SIG para ordenar espacialmente las actividades con mayor potencial contaminante,

identificar zonas vulnerables y localizar drenajes que favorezcan la contaminación por nitratos.

- **Concientización y educación:** Desarrollar campañas educativas dirigidas a la población para informar sobre los riesgos asociados al consumo hídrico contaminado, fomentando prácticas seguras en el manejo y uso del recurso.
- **Tratamiento de aguas residuales:** Implementar sistemas locales de tratamiento que reduzcan la carga de contaminantes antes de que estos alcancen los acuíferos.
- **Control de vertidos industriales y agrícolas:** Regular y supervisar descargas provenientes de industrias, actividades agrícolas y sitios de disposición de residuos, para minimizar el impacto en la calidad del recurso hídrico subterráneo.
- **Diversificación de fuentes de abastecimiento:** Promover el uso de fuentes alternativas de agua que permitan disminuir la presión sobre los acuíferos y garantizar un suministro seguro para el consumo.
- **Fortalecimiento normativo:** Reforzar la legislación vigente en materia de calidad del agua, asegurando su cumplimiento mediante inspecciones, regulaciones y sanciones efectivas a quienes provoquen daños al recurso.
- **Investigación y desarrollo:** Impulsar la investigación científica y el desarrollo de tecnologías innovadoras que favorezcan un mejor conocimiento, monitoreo y protección del agua destinada al uso humano.

4. Conclusiones

Los monitoreos de calidad del agua constituyen una herramienta esencial para generar información confiable sobre el estado del recurso hídrico e identificar oportunamente los problemas asociados a su contaminación.

El índice GWQI resulta particularmente útil para la evaluación integral de la calidad del agua; sin embargo, para que mantenga una efectividad este debe depender de la adecuada selección de los parámetros incluidos en el análisis, así como de la calidad y representatividad de los datos disponibles.

El análisis realizado permitió caracterizar de manera general los parámetros del agua destinada al uso y consumo humano en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco, Tula de Allende y Apaxco.

A partir del índice GWQI, se determinó que la calidad del agua para consumo humano es aceptable en solo el 42% de los pozos analizados, los cuales requerirían únicamente un tratamiento mínimo. En contraste, el 58% restante presenta condiciones clasificadas como regulares, malas o pésimas. Esta situación se asocia principalmente con las altas concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos, arsénico, flúor y nitratos detectadas en los pozos del área de estudio.

La calidad del agua subterránea en la zona de análisis está fuertemente influenciada por la litología local y los procesos geológicos asociados. La predominancia de aguas bicarbonatadas, mixtas y sódico-magnésicas coincide con la presencia de unidades hidroestratigráficas basálticas y zonas de recarga superficial, lo que refleja una interacción agua-roca controlada por la mineralogía del acuífero. Los resultados indican que las concentraciones elevadas de arsénico (As) y fluoruro (F^-) se asocian principalmente a un origen geogénico, vinculado a procesos hidrotermales, disolución de minerales portadores y flujos ascendentes a través de fracturas y fallas, más que a aportes antropogénicos. Esto se evidencia en su correlación con parámetros geológicos y térmicos observados en los pozos.

En contraste, el nitrato ($N-NO_3^-$) presenta un claro origen antropogénico, derivado de prácticas agrícolas, infiltración de aguas residuales y actividades urbanas, lo que resalta la influencia combinada de factores naturales y humanos sobre la calidad del agua. En

conjunto, estos hallazgos confirman que la litología y la estructura geológica desempeñan un papel clave en la movilidad de As y F⁻, mientras que la contaminación por nitratos responde a presiones antrópicas recientes. Esta integración de procesos naturales y actividades humanas subraya la necesidad de estrategias de manejo del acuífero que consideren tanto la dinámica hidrogeológica como las fuentes locales de contaminación.

La presencia de contaminantes (en especial sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico y flúor) en concentraciones que superan los límites establecidos por la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021 representa un riesgo para la salud. El consumo prolongado de agua con estas características puede ocasionar diversos padecimientos, como problemas gastrointestinales, metahemoglobinemia en bebés, niños y adultos, fluorosis dental, alteraciones en el crecimiento óseo, cáncer, lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares y diabetes, según lo documentado por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2017).

El mapa elaborado facilita una visualización clara de la localización y calidad del agua en cada uno de los pozos evaluados, lo que permite una interpretación eficiente de la información espacial. Los datos representados constituyen una herramienta valiosa para identificar las características del recurso hídrico y respaldar la toma de decisiones orientadas a implementar tratamientos adecuados, así como a explorar fuentes alternativas de abastecimiento.

5. Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo brindando a través de la beca otorgada.

Al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) por el respaldo institucional de generar esta investigación aplicada en el acuífero del Valle del Mezquital en beneficio a la comunidad.

Al proyecto Pronaii 318998, “Evaluación de riesgo para la salud humana y ambiental por agentes tóxicos de origen antrópico como herramienta de empoderamiento social. Región Estratégica Ambiental Norte del Estado de México y Zona Tula, Hidalgo” por las gestiones y facilidades con los recursos que se asignaron a este proyecto para poder llevar a cabo la investigación

A todos los colaboradores, que formaron parte de este proyecto e hicieron lo posible para que se llevara a cabo en especial agradecimiento al Dr. José Luis Expósito Castillo, la Dra. Reyna María Guadalupe Fonseca Montes de Oca y la Dra. María Vicenta Esteller Alberich.

6. Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés. Así mismo, los autores de este artículo nos responsabilizamos del contenido del mismo, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

7. Referencias

ATSDR. (1 de 07 de 2017). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*.

Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts204.html#:~:text=El%20nitrato%20y%20el%20nitrito%20se%20disuelven%20f%C3%A1cilmente,el%20agua%20de%20la%20superficie%20y%20agua%20subterr%C3%A1nea.

CONABIO. (2023, marzo 10). *Portal de Información Geográfica—CONABIO*. Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA. (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero

Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo. *SIGAGIS*. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1310.pdf

- CONAGUA. (2024b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle del Mezquital (1310), estado de Hidalgo*.
<https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html>
- DOF. (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano*. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5650705>
- Griffa, C., Boglione, R., Panigatti, C., y Schierano, M. (2023). *Índice de calidad de aguas subterráneas en la región centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina*.
https://www.researchgate.net/publication/374842404_Indice_de_calidad_de_aguas_subterraneas_en_la_region_centro_oeste_de_la_provincia_de_Santa_Fe_Argentina
- Hernández, M. (2023, junio 22). Investigadores detectan contaminación del suelo y agua en el Valle del Mezquital. *Gaceta UNAM*. <https://www.gaceta.unam.mx/advierten-de-contaminacion-del-suelo-y-agua-del-valle-del-mezquital-a-cause-de-aguas-residuales/>
- IMTA. (2022). *La gestión del agua subterránea: Hacer visible lo invisible*. gob.mx.
<http://www.gob.mx/imta/articulos/la-gestion-del-agua-subterranea-haciendo-visible-lo-invisible>
- Instituto del agua. (2024, enero 20). Calidad del Agua en Fuentes Subterráneas: Una Guía Completa para Entender su Importancia y Cómo Asegurarla. *Instituto del Agua*.
<https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/calidad-del-agua-en-fuentes-subterraneas/calidad-del-agua/>

Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., y González-Posadas, D. (2011).

Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 28(3), 323–336.

Saeedi, M., Abessi, O., Sharifi, F., and Meraji, H. (2010). Development of groundwater quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1–4), 327–335.

<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0837-5>

UNESCO. (2020). *Agua y cambio climático* (p. 259) [Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos].

https://aguaysaneamiento.cndh.org.mx/Content/doc/Normatividad/Informe_Agua_Cambio_Climatico.pdf