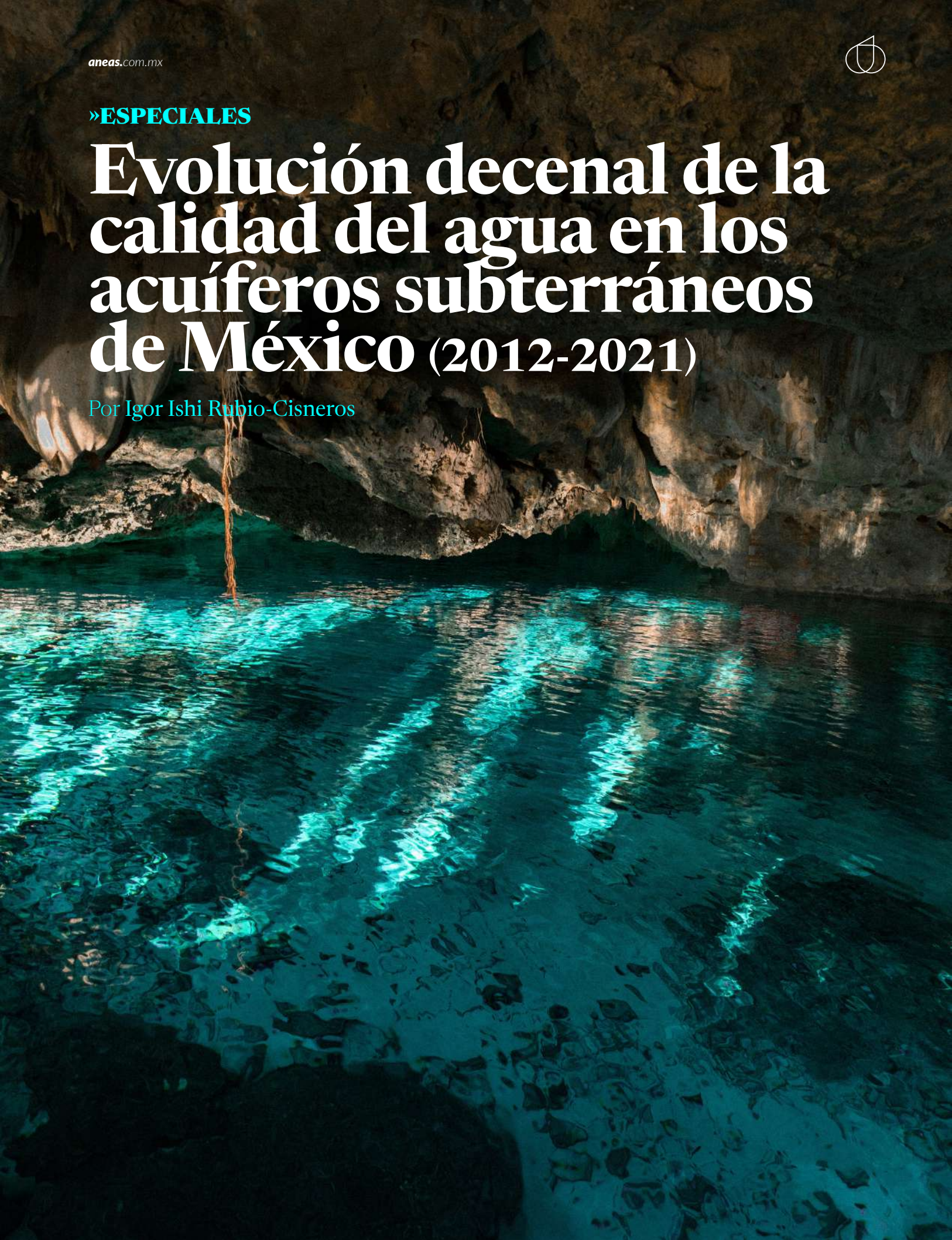


»ESPECIALES

Evolución decenal de la calidad del agua en los acuíferos subterráneos de México (2012-2021)

Por Igor Ishi Rubio-Cisneros



El agua subterránea es un recurso estratégico para México: cerca del 70 % del abastecimiento destinado al consumo urbano, la agricultura y la industria proviene de los acuíferos, especialmente en regiones donde el estrés hídrico es cada vez mayor.

Un estudio publicado en el *Journal of Contaminant Hydrology* analizó la evolución de la calidad del agua subterránea entre 2012 y 2021, revelando un cambio importante en la composición química de los acuíferos. Si bien disminuyeron los episodios de salinidad extrema, también se identificó un incremento de la contaminación difusa relacionada con la agricultura intensiva y otras actividades humanas (Tripathi et al., 2026).

UN PAÍS CLAVE PARA ENTENDER LOS ACUÍFEROS

La diversidad climática, geológica y de usos del suelo convierte a México en un laboratorio natural para estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas. La investigación analizó información de monitoreo de las 32 entidades federativas y comparó 203 puntos de muestreo, desarrollando una metodología que permitió superar las limitaciones derivadas de registros históricos discontinuos.

MENOS SALINIDAD EXTREMA, MÁS CONTAMINACIÓN DIFUSA

Uno de los principales hallazgos fue la reducción de los valores máximos de conductividad eléctrica, indicador asociado a la salinidad. También disminuyeron las concentraciones extremas de sodio y cloruros en diversos acuíferos, lo que sugiere



una atenuación localizada de procesos naturales vinculados con la disolución de minerales y, en algunos casos, con el reúso de agua para riego.

Sin embargo, esta mejora parcial contrasta con el aumento de contaminantes de distribución más amplia, como nitratos, fosfatos, potasio y fluoruro. Estos compuestos están asociados principalmente con la fertilización agrícola, el retorno del agua de riego, la infiltración de aguas residuales y las descargas urbanas, por lo que representan una contaminación persistente y mucho más difícil de revertir.

LA INFLUENCIA HUMANA MODIFICA LA QUÍMICA DEL AGUA

Aunque la geología continúa siendo un factor determinante en la composición química del agua subterránea, el estudio muestra que las actividades humanas ejercen una influencia cada vez mayor sobre los acuíferos.

Las diferencias regionales siguen siendo evidentes. En el norte predominan proce-

La principal enseñanza es clara: el deterioro de la calidad del agua subterránea suele avanzar lentamente y sin señales visibles, pero sus efectos pueden comprometer la disponibilidad y seguridad del recurso en el largo plazo.



Parámetros:	pH	EC (µS/cm)	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	F ⁻	Fe	Mn	As
Límite permisible (LP)	6.5 - 8.5	1500	200	12	50	200	300	250	250	50	0.1	1.5	0.3	0.1	0.01
2012 Rango	6.34 - 9.27	116 - 15160	2 - 1333	0.40 - 42	0.40 - 307	0.30 - 2589	43 - 754	10 - 4893	1.9 - 1310	0.03 - 32.3	0 - 3.2	0.04 - 11.3	0.004 - 4.27	0 - 19.85	0.03 - 0.31
2012 Media ± DS	7.46	1065	93	6.44	27	1169	238	139	130	3.69	0.2	0.74	0.14	0.18	0.01
2012 Desv. Estd.	0.45	1295	117	6.4	34.8	218	107	446	194	4.8	0.4	1.40	0.46	1.44	0.04
LP excedida muestra(%) 2012	3	16.7	6.4	11.8	13.4	12.8	26.6	11.8	14.8	0	66.5	10.3	8.9	10.3	14.3
2021 Rango	6.10 - 8.90	94 - 10640	8 - 402	0.40 - 35.9	0.4 - 99.2	0.4 - 624	51 - 730	10 - 575	1.9 - 910	0.03 - 64.6	0.0 - 18.2	0.04 - 12.34	0 - 2.50	0 - 20.7	0.001 - 0.3
2021 Media ± DS	7.51	998	86	7.7	23	105	231	85	116	5.47	0.4	1.14	0.11	0.15	0.01
2021 Desv. Estd.	0.49	1007	56.6	4.3	16.2	103	88.3	102	158	8.08	1.4	1.29	0.26	1.39	0.03
LP excedida muestra(%) 2021	4.4	19.2	3.4	13.4	5.4	14.3	15.8	6.4	12.8	1	71.4	24.1	4.9	8.4	39.4

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los parámetros de calidad del agua subterránea en México para 2012 y 2021. El conjunto de datos destaca los cambios decenales en la salinidad, la dureza, el enriquecimiento de nutrientes y las concentraciones de oligoelementos en la solución acuosa. Todas las unidades están en mg/L, excepto pH y CE (µS/cm).



Los relacionados con la evaporación y la presencia de sales naturales; en el centro agrícola se registran mayores concentraciones de nitratos y potasio; mientras que en el sur, particularmente en zonas volcánicas, aparecen elementos como fluoruro y manganeso.

NUEVOS RETOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

La investigación concluye que México no enfrenta una mejora generalizada ni un deterioro súbito de sus acuíferos, sino una transformación gradual en su régimen hidroquímico. El país parece transitar de problemas localizados de salinidad extrema hacia procesos de contaminación más difusos, persistentes y extendidos.

Este panorama hace indispensable fortalecer el monitoreo nacional de los acuíferos, desarrollar mapas de riesgo hidroquímico, promover un uso más eficiente de fertilizantes y plaguicidas, mejorar el saneamiento urbano e identificar con mayor precisión las fuentes de contaminación.

La principal enseñanza es clara: el deterioro de la calidad del agua subterránea suele avanzar lentamente y sin señales visibles, pero sus efectos pueden comprometer la disponibilidad y seguridad del recurso en el largo plazo. Comprender esta evolución será fundamental para garantizar una gestión sostenible del agua en México y ofrecer lecciones valiosas para otros países de América Latina.



Las concentraciones extremas de sodio y cloruros en diversos acuíferos disminuyeron, lo que sugiere una atenuación localizada de procesos naturales vinculados con la disolución de minerales y, en algunos casos, con el reúso de agua para riego.

Parámetros	Ubicación	Estados
CE, Na ⁺ , Cl ⁻	Norte árido y semiárido	Baja California; Sonora; Chihuahua; Coahuila; Nuevo León; Tamaulipas
SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺	Norte y transición centro-norte	Chihuahua; Coahuila; Durango; San Luis Potosí
HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , pH	Altiplano central / El Bajío	Guanajuato; Querétaro; San Luis Potosí
NO ₃ ⁻ , K ⁺	Distrito de riego de El Bajío	Guanajuato; Querétaro; Jalisco
NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻	Cuencas centrales periurbanas	Estado de México; Puebla
F ⁻	Eje Neovolcánico Transmexicano	Jalisco; Michoacán; Estado de México; Puebla
Mn, Fe	Sur húmedo y provincias volcánicas	Oaxaca; Chiapas; Guerrero
As	Cuencas selectas del norte y centro	Chihuahua; Coahuila; Durango
Na ⁺ -HCO ₃ ⁻	Cuencas centrales con sobreextracción	Guanajuato; Querétaro; Estado de México
Química mixta	Sur y sureste húmedo	Oaxaca; Chiapas; Veracruz; Yucatán

Tipo de roca (litología del acuífero)	Tipo de acuífero	Proceso hidrogeoquímico dominante	Riesgo para riego / el consumo humano
Evaporitas (halita, yeso) y relleno aluvial	De poros	Disolución de evaporitas, evaporación, reciclaje salino	Riesgo de salinidad y toxicidad específica en cultivos
Yeso/anhidrita y carbonatos	De poros, fracturado y kárstico	Disolución de yeso/anhidrita y carbonatos	Riesgo moderado de salinidad
Caliza, dolomía y aluvión calcáreo	De poros, fracturado y kárstico	Meteorización de carbonatos y disolución	Generalmente apta; vigilancia por sodicidad
Suelos agrícolas de aluvión y fragmentos volcánicos	De poros y fracturado	Fertilización intensiva, retorno de riego	Riesgo para agua potable; eutrofización indirecta
Depósitos superficiales con recarga urbana-agrícola	De poros	Aguas residuales infiltradas y agricultura	Riesgo sanitario y de degradación progresiva
Rocas volcánicas cristalinas, tobas y riolitas	Fracturado	Interacción agua-roca y movilización geogénica	Riesgo para el consumo humano
Depósitos volcánicos y sedimentarios	De poros y fracturado	Procesos redox locales	Problemas operativos de abastecimiento
Unidades volcánicas y sedimentarias localizadas	De poros y fracturado	Liberación geogénica localizada	Riesgo para el consumo humano
Sistemas mixtos aluvial-volcánicos	Poroso aluvial y fracturado	Intercambio catiónico y mezcla hidroquímica	Riesgo por sodicidad en suelos
Regiones con geología compleja	De poros, fracturado y kárstico	Mezcla de fuentes, recarga rápida, disolución	Riesgo variable según vulnerabilidad local

Tabla 2. Parámetros de la química del agua y su relación con la ubicación geográfica y características del acuífero subterráneo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo científico agradecen el apoyo financiero del Tecnológico de Monterrey a través de su Challenge-based Research Grant (PPSoP, Project ID: IJST070-23EG75002), y de su iniciativa Faculty of Excellence para promover la investigación y vinculación académica. También agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) a través del Sistema Nacional de Investigadores (CVU 661793). Asimismo, reconocen a la CONAGUA por haber puesto a disposición del público la base de datos del análisis decenal.

REFERENCIAS:

Tripathi, S., Prasad Panday, D., Torres-Martinez, J.A., Datta, S., Kumar, M., 2026, *Hydrochemical redistribution in a stressed aquifer system: Decadal attenuation of salinity extremes and expansion of diffuse agricultural contamination across Mexico*, *Journal of Contaminant Hydrology*, 279, 104924. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2026.104924>



Igor Ishi Rubio-Cisneros

Colaborador desde 2024 en la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño (EAAD) del Tecnológico de Monterrey, aplicando la geología en diseños regenerativos.

Se integró al Centro del Agua del campus Monterrey en 2025, con base en su doctorado en Geociencias y su formación como ingeniero geólogo. También apoya a la Red Latinoamericana de Investigadores sobre la Dimensión Ambiental de la Resistencia Antimicrobiana (endamrla.com); se ha desempeñado como perito, utilizando la evidencia científica en procedimientos judiciales, como geólogo intérprete en la industria privada del petróleo y como periodista corresponsal en diversos medios informativos especializados en ciencia y naturaleza.

