



Gestión sostenible del recurso hídrico en México

Estrategias empresariales y alianzas público-privadas

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel
Dulce María Monroy Becerril
Christian Muñoz Sánchez
Eugene Hakizimana
(coordinadores)



EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

Gestión sostenible del recurso hídrico en México
Estrategias empresariales y alianzas público-privadas

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. El proceso de dictaminación y su trazabilidad puede consultarse, así como el libro en Acceso Abierto.



comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.493](https://doi.org/10.52501/cc.493)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**
PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
**COLECCIÓN
CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Gestión sostenible del recurso hídrico en México

Estrategias empresariales y alianzas público-privadas

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel
Dulce María Monroy Becerril
Christian Muñoz Sánchez
Eugene Hakizimana
(coordinadores)



**EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

Gestión sostenible del recurso hídrico en México : estrategias empresariales y alianzas público-privadas / coordinadores Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel, Dulce María Monroy Becerril, Christian Muñoz Sánchez, Eugene Hakizimana.— Ciudad de México : Comunicación Científica, 2026. (Colección Ciencia e Investigación).

262 páginas ; 23 × 16.5 centímetros

DOI: 10.52501/cc.493

ISBN: 978-968-9803-42-3

1. Desarrollo de recursos hidrológicos – Administración – México. 2. Abastecimiento de agua – México. 3. Desarrollo sustentable. 4. Responsabilidad empresarial I. Silva Rodríguez de San Miguel, Jorge Alejandro, coordinador. II. Monroy Becerril, Dulce María, coordinadora. III. Muñoz Sánchez, Christian, coordinador. IV. Hakizimana, Eugene, coordinador.

LC: TD345 G47

DEWEY: 333.91 G47

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a D.R. © Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel, Dulce María Monroy Becerril, Christian Muñoz Sánchez y Eugene Hakizimana (coordinadores), 2026. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2026

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2026,

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,

Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,

Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170

info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com

 [comunicacioncientificapublicaciones](#)  @ComunidadCient2

ISBN 978-968-9803-42-3

DOI 10.52501/cc.493



“Obra derivada del proyecto del Instituto Politécnico Nacional IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México”.

Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto,
[en https://doi.org/10.52501/cc.493](https://doi.org/10.52501/cc.493)

Índice

<i>Presentación</i>	9
<i>Prólogo</i>	13
<i>Introducción</i>	19
1. Riesgo hídrico y resiliencia del sector industrial en Nuevo León, <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel</i>	33
2. Baja California: desalación y alianzas público-privadas para la seguridad hídrica, <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel</i>	49
3. Sonora: minería, responsabilidad empresarial y gobernanza del agua, <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel</i>	69
4. Chihuahua: eficiencia hídrica y colaboración público-privada en el sector agroindustrial, <i>Dulce María Monroy Becerril</i>	87
5. Guanajuato: economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero, <i>Dulce María Monroy Becerril</i>	109

6. Querétaro: reúso de agua y alianzas público-privadas para el desarrollo industrial, <i>Eugene Hakizimana</i>	129
7. Jalisco: gobernanza de cuenca y acción colectiva empresarial en torno al lago de Chapala, <i>Eugene Hakizimana</i>	149
8. Puebla: responsabilidad empresarial y colaboración intersectorial para el saneamiento del río Atoyac, <i>Christian Muñoz Sánchez y Eugene Hakizimana</i>	169
9. Veracruz: gestión hídrica y economía circular en los corredores petroquímicos, <i>Christian Muñoz Sánchez</i>	193
10. Quintana Roo: turismo, saneamiento y alianzas público-privadas para la protección del agua, <i>Christian Muñoz Sánchez</i>	217
<i>Conclusiones generales.</i>	243
<i>Epílogo</i>	255
<i>Sobre los autores</i>	259

Presentación



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.00.01>

Los recursos hídricos constituyen uno de los principales desafíos para el desarrollo económico, social y ambiental de México. La distribución desigual del recurso, la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación de ríos y lagos, el crecimiento urbano, la intensificación de las actividades productivas y los efectos del cambio climático han incrementado la vulnerabilidad hídrica de numerosos territorios. Estas condiciones obligan a superar los enfoques centrados exclusivamente en la construcción de infraestructura y avanzar hacia modelos de gobernanza capaces de articular prevención, eficiencia, innovación tecnológica, responsabilidad empresarial, participación social y coordinación institucional.

La obra *Gestión sostenible del recurso hídrico en México: estrategias empresariales y alianzas público-privadas* analiza estas problemáticas desde una perspectiva territorial, empresarial e intersectorial. Su propósito es examinar las posibilidades y limitaciones de la participación privada en la gestión del agua, sin perder de vista que corresponde al Estado conservar la rectoría sobre el recurso, garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento, regular los aprovechamientos, proteger los ecosistemas y vigilar el cumplimiento de las obligaciones ambientales.

El libro se integra por diez capítulos de carácter teórico y documental, cada uno centrado en una entidad federativa y en una problemática productiva específica. Esta organización permite reconocer que la crisis hídrica no se manifiesta de manera uniforme. Las causas, los actores, las fuentes de abastecimiento y las alternativas de solución varían entre las regiones indus-

triales del norte, los corredores manufactureros del centro, las cuencas contaminadas, las zonas agroindustriales y los destinos turísticos del sureste.

El primer capítulo estudia el riesgo hídrico y la resiliencia del sector industrial de Nuevo León, a partir de la necesidad de fortalecer las capacidades de anticipación, eficiencia, circularidad y coordinación territorial. El segundo analiza la desalación y las alianzas público-privadas en Baja California, considerando sus implicaciones energéticas, ambientales, financieras y sociales. El tercero examina la relación entre minería, responsabilidad empresarial y gobernanza del agua en Sonora, con especial atención en la prevención, la transparencia, la reparación y el cierre de las operaciones.

El cuarto capítulo aborda la eficiencia hídrica y la colaboración público-privada en el sector agroindustrial de Chihuahua, destacando que la tecnificación no garantiza por sí misma una reducción de las extracciones. El quinto desarrolla el concepto de economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero de Guanajuato. El sexto analiza el reúso de aguas residuales tratadas y las alianzas para el desarrollo industrial de Querétaro.

El séptimo capítulo se concentra en la gobernanza de cuenca y la acción colectiva empresarial en torno al lago de Chapala. El octavo examina la responsabilidad empresarial y la colaboración intersectorial para el saneamiento del río Atoyac en Puebla. El noveno estudia la gestión hídrica circular en los corredores petroquímicos del sur de Veracruz. Finalmente, el décimo capítulo analiza la relación entre turismo, saneamiento y participación público-privada en Quintana Roo.

A pesar de sus diferencias territoriales, los capítulos comparten una premisa: la seguridad hídrica no puede alcanzarse mediante acciones aisladas. La eficiencia dentro de una empresa, la instalación de una planta de tratamiento o la construcción de una nueva fuente de abastecimiento pueden producir beneficios limitados cuando no se relacionan con el estado de la cuenca, los efectos acumulativos, las necesidades de otros usuarios y la capacidad de los ecosistemas.

La obra propone avanzar hacia una gestión sustentada en balances verificables, reducción de consumos, reúso, recuperación de recursos, monitoreo independiente, información pública, participación comunitaria y distribución clara de responsabilidades. Asimismo, advierte que las alianzas

público-privadas no son soluciones automáticas. Su pertinencia depende de la planeación, la transparencia contractual, la asignación adecuada de riesgos, la capacidad regulatoria y la generación de beneficios públicos comprobables.

Este libro se dirige a estudiantes, docentes, investigadores, servidores públicos, empresarios, consultores y organizaciones interesadas en la administración sostenible del agua. Su finalidad no es ofrecer una fórmula única, sino proporcionar marcos analíticos y propuestas que puedan contribuir al diseño de políticas, estrategias empresariales y mecanismos de colaboración acordes con las condiciones de cada territorio.

La sostenibilidad hídrica requiere reconocer que el agua es, al mismo tiempo, un derecho humano, un bien público, un elemento indispensable para los ecosistemas y un insumo estratégico para las actividades económicas. Conciliar estas dimensiones constituye una responsabilidad compartida, aunque diferenciada, que demanda instituciones sólidas, empresas responsables y sociedades capaces de participar informadamente en las decisiones que afectan su presente y su futuro.

Prólogo



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.00.02>

Hablar del agua en México es hablar de contrastes. El país dispone de extensas cuencas, acuíferos, ríos, lagos, humedales y costas, pero la distribución geográfica y temporal del recurso no coincide con la localización de la población y las principales actividades económicas. Mientras algunas regiones reciben precipitaciones abundantes, otras dependen de acuíferos sometidos a presiones crecientes. En determinados territorios, el problema principal es la escasez; en otros, la contaminación, la insuficiencia de infraestructura, las inundaciones o la debilidad de las instituciones encargadas de administrar el recurso.

Estos contrastes muestran que la crisis hídrica no puede explicarse únicamente mediante la falta de agua. También es consecuencia de decisiones sobre el territorio, modelos productivos, expansión urbana, tecnologías, tarifas, concesiones, descargas, inversión, vigilancia y distribución de los beneficios y costos. La escasez física se combina con problemas de acceso, calidad, continuidad, información y justicia.

Durante décadas, buena parte de las respuestas se concentró en aumentar la oferta. Se construyeron presas, acueductos, pozos, plantas de tratamiento y sistemas de conducción con el propósito de atender una demanda creciente. Estas obras siguen siendo necesarias en numerosos contextos, pero la experiencia demuestra que ampliar la infraestructura sin transformar los patrones de consumo, la contaminación y la gobernanza puede posponer los problemas en lugar de resolverlos.

La gestión contemporánea del agua exige una visión más amplia. No basta con localizar nuevas fuentes; es necesario conservar las existentes, reducir pérdidas, mejorar la productividad, reutilizar el agua, recuperar materiales, proteger zonas de recarga y controlar las descargas. Tampoco es suficiente instalar tecnología: se requiere capacidad de operación, mantenimiento, financiamiento, monitoreo y responsabilidad institucional.

En este escenario, las empresas ocupan una posición relevante. La industria, la minería, la agroindustria, la manufactura, la petroquímica y el turismo dependen del agua y, al mismo tiempo, pueden modificar su disponibilidad y calidad. Las decisiones empresariales sobre localización, producción, proveedores, tecnologías y tratamiento generan efectos que trascienden los límites físicos de las instalaciones.

La responsabilidad empresarial debe comenzar con el cumplimiento de la ley, la prevención de los daños y el control de los impactos propios. Ninguna obra comunitaria, programa de reforestación o aportación económica puede sustituir la obligación de medir, tratar, informar y reparar. La colaboración territorial solo adquiere legitimidad cuando se construye sobre un desempeño interno responsable.

Sin embargo, el cumplimiento individual tampoco basta. Muchos riesgos hídricos son compartidos. Una empresa puede reducir su consumo y seguir expuesta a la sobreexplotación del acuífero, la contaminación de la cuenca o la insuficiencia del sistema urbano. De ahí surge la necesidad de acciones colectivas en las que participen autoridades, empresas, comunidades, usuarios agrícolas, organismos operadores, universidades y organizaciones sociales.

La participación privada puede aportar capital, conocimientos, innovación y capacidad de ejecución. Las empresas pueden intervenir en proyectos de tecnificación, saneamiento, reúso, monitoreo, restauración e infraestructura común. No obstante, la disponibilidad de recursos privados no convierte automáticamente una iniciativa en una buena política pública.

Las alianzas público-privadas requieren una evaluación rigurosa. Es necesario determinar si generan beneficios adicionales, si distribuyen correctamente los riesgos, si los costos son transparentes y si protegen a los usuarios y las finanzas públicas. También debe verificarse que la participación empresarial no se traduzca en ventajas para acceder al agua,

influir en las decisiones regulatorias o sustituir las atribuciones de las autoridades.

La rectoría pública resulta irrenunciable. El agua no puede administrarse exclusivamente conforme a la capacidad económica de los usuarios. Corresponde al Estado establecer prioridades, garantizar el consumo humano y doméstico, proteger los ecosistemas, supervisar las concesiones, vigilar las descargas y sancionar los daños. La colaboración debe fortalecer estas capacidades, no debilitarlas.

Esta obra examina tales desafíos mediante diez aproximaciones territoriales. Nuevo León muestra los riesgos de una economía industrial expuesta a sequías y crisis de abastecimiento. Baja California plantea las posibilidades y los dilemas de la desalación. Sonora evidencia la relación entre minería, prevención y reparación. Chihuahua permite analizar las paradojas de la eficiencia agrícola, mientras que Guanajuato muestra las oportunidades de la economía circular en cadenas manufactureras y agroindustriales.

Querétaro ofrece un escenario para estudiar el reúso industrial y la infraestructura compartida. El lago de Chapala muestra la necesidad de coordinar actores a escala de cuenca. El río Atoyac evidencia las consecuencias de décadas de descargas, falta de saneamiento y fragmentación institucional. Veracruz permite examinar la circularidad en un corredor petroquímico complejo, y Quintana Roo muestra que la sostenibilidad turística depende de proteger un acuífero kárstico altamente vulnerable.

Los casos revelan que no existe una solución universal. La desalación puede ser pertinente en determinadas costas, pero no sustituye la eficiencia ni el control de pérdidas. El riego tecnificado puede reducir el volumen aplicado por hectárea, pero aumentar el consumo territorial si se expande la superficie. El reúso puede disminuir las extracciones, aunque solo cuando sustituye efectivamente agua convencional. Una planta de tratamiento puede tener elevada capacidad nominal y producir pocos beneficios si no recibe caudal, carece de mantenimiento o genera un efluente incompatible con el medio receptor.

La economía circular del agua representa una de las perspectivas transversales de la obra. Su aportación consiste en cuestionar el modelo lineal de extraer, utilizar y descargar. Propone prevenir el consumo, separar corrientes,

recircular, reutilizar y recuperar energía o materiales. Sin embargo, la circularidad debe demostrarse mediante balances completos. No es suficiente reducir el volumen de agua residual cuando se incrementa la energía, se generan concentrados peligrosos o se amplía la extracción total.

Otra dimensión común es la transparencia. La gestión sostenible requiere información sobre fuentes, volúmenes, consumos, descargas, calidad, costos, contratos, incidentes y resultados. Los datos deben ser comparables, verificables y accesibles. Sin información pública, las autoridades tienen dificultades para supervisar, las comunidades no pueden participar de manera informada y las empresas responsables carecen de condiciones para distinguirse de aquellas que solamente comunican compromisos generales.

La participación social también constituye una condición sustantiva. Las comunidades no deben ser consideradas únicamente receptoras de información o beneficiarias de proyectos. Poseen conocimientos territoriales, experimentan directamente los impactos y tienen derecho a intervenir en las decisiones. La desigualdad de capacidades obliga a proporcionar asistencia técnica y mecanismos que permitan una participación efectiva, particularmente en territorios históricamente afectados.

El monitoreo independiente vincula todos estos elementos. Las metas, los contratos y las tecnologías necesitan verificación. El número de obras construidas, los recursos invertidos o los porcentajes declarados no demuestran por sí mismos una mejora. El resultado debe observarse en la reducción de extracciones, cargas contaminantes y riesgos, así como en la recuperación de las fuentes y el acceso de la población.

La sostenibilidad hídrica implica reconocer límites. La innovación puede aumentar la eficiencia, pero no elimina las restricciones ecológicas. El crecimiento económico debe adaptarse a la disponibilidad y capacidad de los territorios. En algunos casos será posible ampliar la producción mediante reúso y circularidad; en otros será necesario modificar cultivos, procesos, localizaciones o ritmos de expansión.

El futuro del agua en México dependerá de la capacidad para transformar las relaciones entre Estado, empresas y sociedad. Las instituciones necesitan recuperar capacidad regulatoria y de planeación; las empresas deben incorporar el riesgo hídrico a sus decisiones estratégicas; y la sociedad requiere información y espacios efectivos para participar.

Esta obra propone contribuir a ese proceso. Su principal mensaje es que la colaboración resulta necesaria, pero debe estar acompañada de responsabilidad, transparencia y justicia. La tecnología y el financiamiento pueden ampliar las opciones disponibles, pero su orientación debe responder al interés público y a la conservación de los sistemas hídricos.

Gestionar sosteniblemente el agua significa proteger la vida, garantizar derechos y sostener actividades económicas dentro de límites verificables. Significa también aceptar que ninguna organización puede asegurar su futuro de manera aislada. La seguridad hídrica de una empresa depende de la cuenca; la de una ciudad, de sus ecosistemas; y la de una sociedad, de la calidad de sus instituciones y de su capacidad para actuar colectivamente.

Introducción



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.00.03>

El agua como condición del desarrollo sostenible

El agua constituye un elemento indispensable para la vida, la salud, la producción de alimentos, el funcionamiento de las ciudades, la generación de energía, la conservación de los ecosistemas y el desarrollo de prácticamente todas las actividades económicas. Su importancia trasciende la condición de insumo productivo: es un derecho humano, un bien de interés público, un componente esencial de los sistemas naturales y un factor estratégico para la estabilidad social y territorial. Por ello, los problemas relacionados con su disponibilidad, calidad, acceso y gestión no pueden analizarse exclusivamente desde una perspectiva técnica o administrativa.

En México, la gestión del agua enfrenta profundas diferencias regionales. Las zonas con mayor disponibilidad natural no coinciden necesariamente con aquellas donde se concentra la población, la infraestructura o la actividad económica. El norte y el centro del país reúnen importantes corredores industriales, agrícolas, mineros y urbanos, pero presentan condiciones de aridez, sequías recurrentes y presión creciente sobre los acuíferos. En contraste, algunas regiones del sur y sureste disponen de mayores escurrimientos, aunque enfrentan problemas de contaminación, saneamiento insuficiente, vulnerabilidad de los acuíferos y desigualdad en el acceso a los servicios.

Esta diversidad impide hablar de una sola crisis hídrica nacional. En determinados territorios predomina la insuficiencia de agua; en otros, el deterioro de su calidad, la sobreexplotación subterránea, las pérdidas en las redes, la descarga de aguas residuales sin tratamiento, la exposición a

inundaciones o la debilidad de las instituciones. Con frecuencia, varios de estos problemas se presentan simultáneamente y generan riesgos acumulativos para la población, las empresas y los ecosistemas.

El cambio climático amplifica estas presiones al modificar los patrones de precipitación, elevar la evapotranspiración y aumentar la frecuencia o intensidad de eventos extremos. Las sequías prolongadas reducen los almacenamientos y la recarga, mientras que las lluvias intensas pueden rebasar drenajes y plantas de tratamiento, movilizar contaminantes y afectar la infraestructura. La seguridad hídrica requiere, por tanto, capacidades para enfrentar tanto la escasez como los excesos y las alteraciones de la calidad del recurso (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2024).

La respuesta histórica se ha concentrado principalmente en ampliar la oferta mediante presas, pozos, acueductos, plantas potabilizadoras y otras obras hidráulicas. Estas inversiones siguen siendo necesarias en distintos contextos, pero resultan insuficientes cuando no se acompañan de reducción de pérdidas, eficiencia, tratamiento, reúso, conservación de fuentes, mantenimiento, transparencia y ordenamiento territorial. Construir nueva infraestructura sin modificar los patrones de demanda puede posponer los problemas, incrementar los costos y trasladar los impactos hacia otras regiones o generaciones.

La sostenibilidad hídrica exige transitar desde una política centrada en obtener más agua hacia una gestión que considere cuánto recurso existe, quién lo utiliza, para qué actividades, con qué eficiencia, qué calidad devuelve y cuáles son los efectos acumulativos sobre la cuenca o el acuífero. Esta transformación implica reconocer límites hidrológicos, asignar responsabilidades y relacionar las decisiones productivas con las condiciones territoriales.

Actividades económicas y riesgo hídrico

Las empresas mantienen una relación directa e indirecta con el agua. La utilizan en sus procesos, servicios, sistemas de enfriamiento, limpieza, generación de vapor, producción de materias primas, actividades sanitarias y

cadenas de suministro. También dependen de la infraestructura pública, de trabajadores con acceso a servicios adecuados y de ecosistemas capaces de mantener fuentes de calidad.

El riesgo hídrico empresarial no se limita a la posibilidad de recibir menos agua. Comprende el deterioro de las fuentes, el incremento de los costos de tratamiento y energía, las restricciones regulatorias, las interrupciones operativas, los conflictos con comunidades, la pérdida de proveedores, los daños ambientales y las afectaciones reputacionales. Una organización puede contar con una concesión vigente y permanecer expuesta si el acuífero continúa abatiéndose o si el cuerpo receptor pierde capacidad para asimilar las descargas.

De manera similar, una empresa puede mejorar su eficiencia interna sin resolver su exposición territorial. La reducción del consumo por unidad producida constituye un avance, pero puede coexistir con un aumento de la extracción total cuando crece la producción. El porcentaje de agua recirculada tampoco demuestra por sí mismo una disminución equivalente del consumo, ya que el mismo volumen puede contabilizarse varias veces dentro del proceso. Por ello, los indicadores relativos deben complementarse con balances absolutos y con información sobre el estado de la fuente compartida (Morseletto et al., 2022).

Las actividades productivas examinadas en esta obra muestran distintas modalidades de dependencia e impacto. La industria manufacturera requiere agua para enfriamiento, tratamiento de superficies, limpieza, calderas y servicios. La minería puede modificar flujos superficiales y subterráneos, generar residuos de larga duración y exponer grandes territorios a los efectos de fallas o filtraciones. La agroindustria depende del riego, de la disponibilidad climática y de cadenas primarias que concentran buena parte del consumo.

La industria petroquímica utiliza grandes volúmenes y produce efluentes de composición compleja. El turismo necesita agua para habitaciones, lavanderías, jardines, piscinas, alimentos y servicios, además de depender de playas, cenotes, lagunas, humedales y arrecifes cuya calidad constituye parte de su atractivo económico. Estas diferencias muestran que no existe una estrategia tecnológica única aplicable a todos los sectores.

La responsabilidad empresarial comienza con el cumplimiento normativo, la prevención y el control de los impactos propios. Una empresa responsable debe conocer sus fuentes, medir los volúmenes, identificar pérdidas, tratar las descargas, mantener la infraestructura y responder ante los daños atribuibles a sus actividades. Las aportaciones a proyectos comunitarios, campañas ambientales o iniciativas colectivas no sustituyen estas obligaciones.

No obstante, el cumplimiento individual tampoco resuelve todos los problemas. Las cuencas, los acuíferos y los sistemas urbanos son compartidos por numerosos actores. La calidad y disponibilidad dependen de decisiones públicas, empresariales, agrícolas, domésticas y comunitarias. Incluso una instalación con un desempeño adecuado puede permanecer vulnerable si los demás usuarios extraen o contaminan por encima de la capacidad del sistema.

Esta interdependencia convierte la colaboración en una necesidad. Sin embargo, cooperar no significa distribuir de manera uniforme las responsabilidades. Cada actor debe asumir las obligaciones derivadas de sus funciones, capacidades e impactos. Corresponde al Estado regular y garantizar derechos; a las empresas, prevenir, cumplir y reparar; a las instituciones científicas, aportar evidencia independiente; y a las comunidades, participar en decisiones que afectan sus territorios y formas de vida.

Gobernanza hídrica y rectoría pública

La gobernanza del agua comprende las instituciones, normas, actores, procedimientos y relaciones mediante los cuales se adoptan y ejecutan decisiones sobre el recurso. Incluye la asignación, el abastecimiento, la calidad, el saneamiento, la infraestructura, el financiamiento, la conservación, la información y la participación social.

El concepto permite superar una visión limitada a la administración gubernamental, ya que reconoce la intervención de organismos operadores, empresas, asociaciones de usuarios, organizaciones civiles, universidades y comunidades. Sin embargo, esta ampliación no debe confundirse con la retirada del Estado. La participación de actores privados no elimina la res-

pensabilidad pública de regular, supervisar, sancionar y proteger el interés colectivo.

La rectoría pública resulta especialmente importante porque el agua no puede asignarse únicamente conforme a la capacidad económica de los usuarios. La política hídrica debe garantizar prioritariamente el consumo humano y doméstico, proteger los ecosistemas y establecer límites a los aprovechamientos. Las alianzas y los mecanismos de mercado pueden apoyar determinados objetivos, pero no sustituir las decisiones democráticas ni los derechos reconocidos.

La gobernanza requiere también coordinación entre escalas. Los problemas hídricos trascienden los límites de las empresas, municipios y estados. Una descarga realizada aguas arriba puede afectar poblaciones situadas a gran distancia; una extracción local puede modificar la disponibilidad regional; y una planta de tratamiento puede recibir contaminantes generados por establecimientos ubicados en diferentes jurisdicciones. La cuenca y el acuífero constituyen escalas indispensables para comprender estos efectos acumulativos.

La coordinación intergubernamental es particularmente compleja en sistemas compartidos por varias entidades federativas, como la cuenca Lerma-Chapala o el Alto Atoyac. Las instituciones pueden poseer competencias parciales sobre agua, ambiente, salud, agricultura, energía, desarrollo urbano y protección civil. Cuando la información y las decisiones permanecen fragmentadas, resulta difícil identificar responsabilidades, priorizar inversiones y evaluar resultados.

La gobernanza adaptativa ofrece una respuesta ante esta complejidad. Consiste en establecer reglas e instituciones capaces de aprender, monitorear y modificar las estrategias cuando cambian las condiciones o aparecen nuevos conocimientos. La adaptación no debe utilizarse para generar incertidumbre regulatoria, sino para ajustar las medidas mediante procedimientos transparentes, evidencia científica y participación (Saikia y Jiménez, 2023).

La participación social constituye una dimensión sustantiva de la gobernanza. Las comunidades no son únicamente beneficiarias de infraestructura o receptoras de información; poseen conocimientos territoriales, experimentan los impactos y tienen derecho a intervenir en las decisiones. Para que la participación sea efectiva, debe comenzar durante la definición

del problema, proporcionar información comprensible y permitir que las observaciones influyan realmente en los proyectos.

Las diferencias de poder deben reconocerse explícitamente. Organismos como una gran empresa, un organismo público, una comunidad rural y una pequeña organización no cuentan con los mismos recursos técnicos, económicos o jurídicos. La igualdad formal en una mesa de diálogo no corrige estas asimetrías. Se requieren mecanismos de asistencia técnica, financiamiento independiente y representación equilibrada.

Economía circular, eficiencia y reúso

Una de las perspectivas transversales de la obra es la economía circular del agua. Este enfoque cuestiona el modelo lineal basado en extraer, utilizar, tratar parcialmente y descargar. En su lugar, propone prevenir el consumo, reducir pérdidas, recircular dentro de los procesos, reutilizar corrientes tratadas, recuperar materiales y energía y contribuir a la regeneración de las fuentes (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

La circularidad debe aplicarse mediante una jerarquía. La primera acción consiste en evitar consumos innecesarios; posteriormente deben mejorarse la eficiencia y el mantenimiento; después pueden incorporarse la recirculación y el reúso. El tratamiento avanzado no debe utilizarse para sostener procesos ineficientes cuando existen alternativas de reducción en el origen.

La medición constituye el punto de partida. Las organizaciones necesitan balances capaces de identificar fuentes, usos, pérdidas, evaporación, consumo consuntivo, recirculación y descarga. Los datos agregados de una planta o corporación son insuficientes cuando se pretende localizar oportunidades o relacionar el desempeño con una cuenca determinada.

La calidad adecuada para cada uso representa otro principio fundamental. No todas las actividades necesitan agua potable. El enfriamiento, los servicios sanitarios, el control de polvo, determinados lavados y el riego pueden utilizar agua regenerada con características específicas. El tratamiento debe alcanzar la calidad necesaria para proteger la salud, los equipos

y el ambiente, sin incurrir en procesos innecesariamente intensivos en energía y reactivos.

El reúso puede reducir la presión sobre fuentes convencionales, pero su contribución debe comprobarse. Cuando una empresa incorpora agua tratada y mantiene sus extracciones originales para ampliar la producción, aumenta su oferta privada, aunque no necesariamente mejora la seguridad hídrica territorial. El indicador relevante es el volumen de agua convencional efectivamente sustituido.

La economía circular también presenta riesgos. Los sistemas de membranas, oxidación avanzada o descarga líquida cero pueden disminuir los efluentes, pero consumir más energía y producir lodos o concentrados difíciles de gestionar. Una solución no es circular cuando únicamente transfiere la contaminación del agua hacia el suelo, el aire o residuos peligrosos.

Por ello, las decisiones deben considerar el ciclo de vida completo, los costos, el mantenimiento, los productos químicos, la energía y el destino de los residuos. El porcentaje de reúso constituye una medida parcial que debe complementarse con información sobre captación, consumo, calidad, cargas contaminantes e impactos territoriales.

La simbiosis industrial amplía la circularidad entre organizaciones. Las empresas pueden compartir plantas de tratamiento, redes de agua regenerada, laboratorios, vapor, calor, residuos y sistemas de emergencia. La proximidad de parques y corredores favorece estas relaciones, aunque también genera dependencia entre los participantes.

Los intercambios requieren contratos que regulen calidad, continuidad, medición, tarifas, responsabilidades e incidentes. La infraestructura común puede generar economías de escala, pero no debe convertirse en un mecanismo para transferir efluentes peligrosos hacia instalaciones colectivas sin pretratamiento ni trazabilidad.

Alianzas público-privadas y colaboración empresarial

Las necesidades de infraestructura, tecnología y operación han incrementado el interés por las alianzas público-privadas. Estos arreglos comprenden

relaciones contractuales mediante las cuales actores públicos y privados distribuyen responsabilidades y riesgos para diseñar, financiar, construir, operar o mantener infraestructura y servicios.

En el sector hídrico, las alianzas pueden aplicarse a plantas de tratamiento, desalación, redes de reúso, reducción de fugas, modernización del riego, monitoreo e infraestructura compartida. También pueden adoptar modalidades menos complejas, como convenios de coinversión, contratos de desempeño, compras garantizadas de agua regenerada o participación empresarial en fondos territoriales.

La participación privada puede aportar capital, innovación, especialización y capacidad operativa. No obstante, no garantiza automáticamente eficiencia, calidad o sostenibilidad. Los resultados dependen de la planeación, competencia, distribución de riesgos, supervisión y transparencia contractual (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Una alianza debe evaluarse por el valor público que genera. No basta con demostrar que moviliza inversión fuera del presupuesto inmediato. Es necesario determinar quién pagará finalmente la infraestructura, qué riesgos conservará el gobierno, qué indicadores se utilizarán, cómo se protegerá a los usuarios y qué sucederá cuando termine el contrato.

La asignación de riesgos debe corresponder con la capacidad de control. El socio privado puede asumir los riesgos de diseño, construcción, operación y mantenimiento; el Estado conserva la regulación, la planeación y la protección de derechos. Los riesgos de demanda, calidad del influente, energía o eventos extremos pueden requerir mecanismos compartidos.

Los contratos de desempeño constituyen una alternativa relevante. En lugar de remunerar únicamente la construcción o instalación de equipos, vinculan una parte del pago con resultados verificables, como calidad, continuidad, reducción de fugas, disminución de extracciones o ahorro energético. Este modelo puede mejorar los incentivos, siempre que existan líneas base confiables y verificación independiente.

Las alianzas también deben prevenir pasivos fiscales, renegociaciones opacas y privilegios de acceso. Una empresa que participa en el financiamiento de infraestructura no debe obtener control sobre las decisiones regulatorias ni prioridad sobre el consumo humano. La colaboración debe fortalecer la capacidad pública y no convertirse en una vía para privatizar

las decisiones sobre el recurso. La acción colectiva empresarial comprende una modalidad más amplia de colaboración. Varias empresas pueden coordinarse para atender riesgos compartidos mediante monitoreo, restauración, tratamiento o eficiencia de cadenas de suministro. Estas iniciativas son pertinentes cuando los problemas exceden el ámbito de cada instalación.

Sin embargo, la acción colectiva debe distinguirse de la responsabilidad individual. Una empresa no puede utilizar una aportación a un proyecto territorial para compensar un incumplimiento propio. Primero debe controlar sus impactos y posteriormente colaborar en problemas compartidos. Esta secuencia evita que la cooperación se transforme en un instrumento reputacional (Alliance for Water Stewardship, 2024).

Propósito y objetivos de la obra

La obra tiene como propósito analizar los desafíos y alternativas de gestión sostenible del agua en diez entidades federativas de México, con énfasis en la responsabilidad empresarial, la innovación, la acción colectiva y las alianzas público-privadas. Se busca relacionar las prácticas internas de las organizaciones con las condiciones de las cuencas, acuíferos y sistemas urbanos de los que dependen.

El objetivo general consiste en examinar las condiciones tecnológicas, económicas, institucionales, ambientales y sociales necesarias para que la participación empresarial contribuya a la seguridad hídrica territorial sin sustituir la rectoría pública ni trasladar costos hacia la sociedad y los ecosistemas.

De este propósito se desprenden varios objetivos específicos. El primero es identificar las formas de dependencia e impacto de distintos sectores productivos. El segundo es analizar las posibilidades y limitaciones de la eficiencia, el tratamiento, el reúso y la economía circular. El tercero es examinar los mecanismos de colaboración empresarial y público-privada. El cuarto es proponer criterios para evaluar su legitimidad y desempeño.

La pregunta transversal que orienta el libro es la siguiente: ¿bajo qué condiciones pueden las estrategias empresariales y los mecanismos de colaboración contribuir efectivamente a la gestión sostenible del agua en

territorios con diferentes características económicas, hidrológicas y sociales? La respuesta propuesta sostiene que la participación privada produce valor público cuando cumple seis condiciones: se sustenta en responsabilidad individual; responde a las prioridades del territorio; reduce de manera comprobable extracciones o contaminantes; mantiene la rectoría pública; incorpora transparencia y monitoreo independiente; y distribuye equitativamente los beneficios y riesgos.

Enfoque metodológico y alcance

Los capítulos se desarrollaron mediante investigaciones teóricas y documentales con enfoque cualitativo e integrativo. La revisión incluyó artículos científicos, documentos oficiales, normas, estadísticas, planes, diagnósticos, información hidrológica y literatura especializada en responsabilidad empresarial, tratamiento, gobernanza y colaboración público-privada.

Se priorizó bibliografía reciente, sin excluir antecedentes necesarios para comprender la evolución de determinados casos. Las fuentes fueron seleccionadas con base en su relación con las preguntas de investigación, procedencia académica u oficial, claridad metodológica y utilidad para construir propuestas aplicables a cada territorio.

El análisis no pretende determinar responsabilidades jurídicas individuales, calcular el consumo de empresas específicas ni evaluar directamente contratos o proyectos en operación. Su finalidad es identificar patrones, riesgos, condiciones institucionales y alternativas de gestión. Las propuestas se presentan como marcos conceptuales que requieren adaptación y validación antes de su aplicación práctica.

Una limitación transversal es la ausencia de información pública homogénea. Los datos empresariales suelen presentarse de manera agregada y las estadísticas oficiales no siempre permiten relacionar captaciones, usos, descargas y calidad por instalación. También existen diferencias entre la capacidad nominal de la infraestructura y su funcionamiento efectivo.

Esta falta de información no constituye solamente una restricción metodológica, sino un hallazgo. La transparencia insuficiente limita la supervisión pública, dificulta la evaluación de políticas y reduce la capacidad de

las comunidades para participar. Por ello, la generación y publicación de datos verificables forma parte de las propuestas de todos los capítulos.

Organización de los capítulos

El primer capítulo examina el riesgo hídrico y la resiliencia del sector industrial de Nuevo León. La crisis de abastecimiento experimentada en la entidad muestra que la competitividad industrial depende de la disponibilidad territorial, la infraestructura urbana y la capacidad de responder ante sequías. El capítulo propone integrar eficiencia, reúso, diversificación de fuentes, protocolos de emergencia y colaboración entre empresas y autoridades.

El segundo capítulo analiza la desalación en Baja California. Esta tecnología puede diversificar el abastecimiento en ciudades costeras, pero presenta exigencias energéticas, costos, generación de salmuera y riesgos contractuales. La discusión se concentra en las condiciones bajo las cuales una alianza público-privada puede producir agua sin comprometer las finanzas públicas ni los ecosistemas marinos.

El tercer capítulo estudia la relación entre minería, responsabilidad empresarial y gobernanza del agua en Sonora. El caso del río Sonora evidencia la importancia de la prevención, el monitoreo independiente, la transparencia, la reparación integral y el seguimiento posterior al cierre. Se plantea que la administración responsable del agua no debe sustituir la regulación estatal.

El cuarto capítulo aborda la eficiencia hídrica y la colaboración público-privada en el sector agroindustrial de Chihuahua. La tecnificación del riego puede mejorar la productividad, pero no garantiza un ahorro territorial cuando los volúmenes recuperados se destinan a ampliar la superficie. Se propone vincular los apoyos con medición, reducción neta y reconversión productiva.

El quinto capítulo desarrolla el concepto de economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero de Guanajuato. La concentración de actividades automotrices, alimentarias y de curtiduría ofrece oportunidades para separar corrientes, recuperar recursos y compartir infraestructura, aunque los intercambios deben demostrar una reducción efectiva de la presión sobre los acuíferos.

El sexto capítulo examina el reúso industrial y las alianzas público-privadas en Querétaro. La disponibilidad negativa de varios acuíferos convierte el agua regenerada en una fuente estratégica. Se analizan la calidad adecuada para cada uso, las redes duales, los contratos de suministro y el principio de sustitución verificable.

El séptimo capítulo analiza la gobernanza de la cuenca Lerma-Chapala y la acción colectiva empresarial en torno al lago de Chapala. La interdependencia territorial exige coordinar a gobiernos, empresas, productores, comunidades y academia. Se propone fortalecer las instituciones existentes y evitar que las aportaciones privadas se traduzcan en una influencia desproporcionada.

El octavo capítulo estudia la responsabilidad empresarial y la colaboración intersectorial para el saneamiento del río Atoyac en Puebla. La contaminación combina descargas municipales, industriales y otras fuentes. El saneamiento requiere cumplimiento, regularización, infraestructura compartida, monitoreo y atención a la salud y la justicia ambiental.

El noveno capítulo aborda la gestión circular en los corredores petroquímicos de Veracruz. Las oportunidades incluyen recuperación de condensados, tratamiento avanzado, reúso, recuperación de hidrocarburos y simbiosis industrial. Estas medidas deben integrarse con prevención de emergencias, transparencia y protección de las comunidades.

El décimo capítulo examina la relación entre turismo, saneamiento y alianzas público-privadas en Quintana Roo. La vulnerabilidad del acuífero kárstico exige vincular el crecimiento turístico con la capacidad de recolección, tratamiento, reúso y protección de cenotes, humedales y ecosistemas costeros.

Aportación de la obra

La principal aportación del libro consiste en relacionar la gestión empresarial del agua con las condiciones territoriales. La eficiencia interna es necesaria, pero no suficiente. La sostenibilidad exige comprobar que los avances de una organización contribuyen a reducir la presión sobre las fuentes y no solamente a garantizar su propio abastecimiento.

Una segunda aportación es la integración de tecnología, gobernanza y justicia. Los problemas hídricos no se resuelven únicamente mediante equipos o infraestructura. Las decisiones sobre quién recibe agua, quién paga, quién participa y quién soporta los impactos son igualmente relevantes.

La tercera aportación es la diferenciación entre responsabilidad y colaboración. El cumplimiento, la prevención y la reparación corresponden al actor que genera o controla el impacto. La colaboración comienza cuando se atienden problemas compartidos que exceden su ámbito individual. Confundir ambos niveles facilita la simulación y el lavado verde.

La cuarta aportación es la incorporación de criterios para evaluar las alianzas público-privadas. La inversión movilizadora no constituye por sí misma un indicador de éxito. Los proyectos deben demostrar valor público, distribución adecuada de riesgos, transparencia, sostenibilidad financiera y resultados ambientales.

Finalmente, la obra propone una visión multiescalar. Las acciones deben evaluarse en la instalación, la cadena productiva, el corredor económico y la cuenca o acuífero. Una medida puede ser eficiente en una escala y generar impactos negativos en otra. La sostenibilidad surge cuando los beneficios empresariales son compatibles con los límites territoriales y los derechos colectivos.

El futuro hídrico de México dependerá de la capacidad para transformar la relación entre producción, territorio e instituciones. Las empresas poseen recursos y capacidades relevantes, pero su participación debe orientarse mediante regulación, transparencia y objetivos públicos. Las autoridades necesitan fortalecer su capacidad de planeación y supervisión, mientras que las comunidades deben contar con información y condiciones reales para participar.

Gestionar sosteniblemente el agua significa aceptar que ninguna organización puede asegurar su futuro de manera aislada. La seguridad de una empresa depende de la cuenca; la de una ciudad, de sus fuentes y ecosistemas; y la de la sociedad, de la calidad de sus instituciones. Esta obra parte de esa interdependencia y propone convertirla en una base para la responsabilidad, la colaboración y la acción colectiva.

Referencias

- Alliance for Water Stewardship. (2024). Unpacking collective action in water stewardship: Shared water challenges and collective solutions.
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Lima, S., Brochado, A., y Marques, R. C. (2021). Public-private partnerships in the water sector: A review. *Utilities Policy*, 69, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101182>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public-private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz. UNESCO.
- Saikia, P., y Jiménez, A. (2023). Governance attributes for building water resilience: A literature review. *Water International*, 48(7), 809-838. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2274162>

1. Riesgo hídrico y resiliencia del sector industrial en Nuevo León*

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.01>

Resumen

Nuevo León se encuentra entre los estados más industrializados de México, pero su crecimiento económico ocurre en un entorno semiárido susceptible a la sequía, la variabilidad de las precipitaciones y la competencia por fuentes de suministro cada vez más limitadas entre usuarios urbanos, agrícolas e industriales. El objetivo de este capítulo es examinar, mediante una investigación teórica y documental, los factores que definen el riesgo hídrico del sector industrial de Nuevo León, así como las capacidades que deben fortalecerse para mejorar su resiliencia.

La revisión sintetiza aportes sobre seguridad hídrica, riesgo empresarial, resiliencia organizacional, economía circular del agua y gobernanza colaborativa. Los resultados indican que el riesgo industrial depende no solo de la disponibilidad física del recurso, sino también de la infraestructura, la regulación, las cadenas de suministro, la coordinación institucional y la legitimidad social de las empresas. Se propone un modelo conceptual integrado por seis capacidades: anticipación, eficiencia, circularidad, diversificación responsable, colaboración territorial y transparencia. Se concluye que la resiliencia industrial no debe entenderse como la autosuficiencia aislada de cada empresa, sino como la capacidad de mantener la continuidad

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor-investigador de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; Scopus ID: 5719 7809938 ; correo: jasilva@ipn.mx

productiva mientras se reduce la vulnerabilidad de las organizaciones y del sistema hídrico compartido.

Palabras clave: *riesgo hídrico, resiliencia industrial, seguridad hídrica, gobernanza colaborativa.*

Introducción

Nuevo León ocupa una posición central en la estructura económica de México. El estado se ha especializado en la manufactura y alberga una densa concentración de empresas nacionales e internacionales, parques industriales y cadenas de suministro integradas, lo que lo convierte en uno de los principales centros industriales del país. Entre sus actividades destacan la producción de productos metálicos, maquinaria y equipo, equipo eléctrico, automóviles, productos químicos, alimentos, vidrio para bebidas, cemento, acero y plásticos. Esta configuración productiva genera empleo, inversión y capacidades tecnológicas, pero también incrementa la demanda de energía, infraestructura, suelo y agua (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2026a; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025).

El agua es esencial para la industria, no solo cuando se incorpora directamente a los productos. También se utiliza en actividades de enfriamiento, lavado y limpieza, generación de vapor, transporte de materiales y sustancias químicas, esterilización, mantenimiento de equipos de control de emisiones y servicios al personal. Incluso las empresas con baja intensidad hídrica pueden depender del recurso en etapas críticas de sus procesos o a través de sus proveedores. Por ello, cualquier interrupción del suministro, deterioro de la calidad o incremento de los costos puede poner en riesgo la continuidad operativa y la competitividad regional.

Esta dependencia adquiere especial relevancia en Nuevo León debido a las características climáticas e hidrológicas del territorio. La Zona Metropolitana de Monterrey se localiza en una región semiárida, con precipitación irregular y periodos prolongados de sequía. Los embalses dependen de episodios de lluvia para recuperar sus niveles, mientras que las fuentes sub-

terráneas enfrentan presiones derivadas del crecimiento poblacional, la expansión urbana y las actividades productivas (Magaña et al., 2021).

La crisis de suministro de 2022 y las vulnerabilidades del sistema hídrico

La disminución de los niveles de las presas Cerro Prieto, La Boca y El Cu-chillo provocó la declaratoria de emergencia y la aplicación de restricciones al suministro, junto con medidas extraordinarias para priorizar el consumo doméstico y el uso público urbano. La crisis alteró la vida de la población y planteó interrogantes sobre la continuidad de las actividades económicas (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2022).

Sin embargo, la crisis no se debe simplemente a la falta de lluvia. La sequía meteorológica se transformó en una sequía socioeconómica debido al crecimiento de la demanda, las pérdidas en las redes de distribución, la dependencia de pocas fuentes, la expansión metropolitana y las deficiencias de planeación. Magaña et al. (2021) analizan Monterrey como un ejemplo de la interacción entre condiciones climáticas, urbanas e institucionales, mientras que Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo (2024) examinan las dimensiones socioeconómicas de la escasez hídrica en México. De manera complementaria, Barajas Madrigal et al. (2024) sostienen que la conducta reciente de los acuíferos del Área Metropolitana de Monterrey debe explicarse considerando tanto las condiciones climáticas como el crecimiento de la demanda y la gestión del recurso.

Para las empresas, la escasez puede traducirse en menor producción, cancelación de turnos, aumento de los costos de abastecimiento, dificultades para cumplir pedidos y pérdida de competitividad. También puede generar impactos reputacionales cuando la población percibe que los intereses industriales reciben un trato preferente durante una emergencia. En estas circunstancias, la gestión empresarial del agua deja de ser únicamente un asunto técnico y adquiere dimensiones sociales, institucionales y éticas.

Contar con una concesión o con una fuente privada no elimina el riesgo empresarial. Una organización puede estar legalmente autorizada para captar agua y, al mismo tiempo, enfrentar conflictos sociales, restricciones

extraordinarias, deterioro ambiental o amenazas a su legitimidad. La continuidad productiva depende de la estabilidad del sistema hídrico regional y de la capacidad de las empresas para operar responsablemente dentro del territorio.

El capítulo examina los componentes del riesgo hídrico en el sector industrial de Nuevo León y propone un marco conceptual para fortalecer su resiliencia. La pregunta que orienta el análisis es la siguiente: ¿cómo puede incrementarse la resiliencia hídrica industrial sin trasladar costos y riesgos a la población, al Estado o a los ecosistemas, y qué mecanismos de colaboración público-privada se requieren para ello?

Una empresa que únicamente logra mantener sus operaciones durante una sequía no es, por definición, resiliente. La resiliencia exige comprender de dónde proviene el agua, con qué eficiencia se utiliza, cómo se gestionan las descargas, qué medidas existen frente a inundaciones y de qué manera la organización contribuye a la seguridad hídrica territorial. Una estrategia que protege una planta mediante nuevas extracciones, pero incrementa la presión sobre un acuífero, solo desplaza el riesgo hacia otros usuarios.

Aproximación teórica y conceptual

El concepto de riesgo empresarial hídrico se refiere a la posibilidad de que las condiciones relacionadas con la disponibilidad, calidad, acceso, regulación o gobernanza del agua provoquen impactos negativos en las actividades de una organización. El riesgo no está determinado únicamente por la cantidad de agua consumida. También depende de las características locales de sus fuentes de suministro, la eficiencia de sus procesos, la fragilidad de los proveedores y la capacidad institucional en el territorio donde opera (CDR, 2023; Zhu et al., 2024).

Desde esta perspectiva, pueden distinguirse riesgos físicos, operativos, regulatorios, financieros, reputacionales y relacionados con la cadena de suministro. Estas categorías se superponen y pueden presentarse simultáneamente durante una crisis.

Los riesgos físicos se relacionan con la cantidad y la calidad del recurso. Incluyen sequías, disminución de los niveles de los embalses y de las aguas

subterráneas, contaminación de las fuentes, variaciones en las precipitaciones e inundaciones. Aunque la sequía constituye una amenaza recurrente para Nuevo León, las inundaciones también pueden dañar infraestructura, interrumpir redes y provocar pérdidas logísticas. Por ello, las empresas deben considerar tanto la escasez como el exceso de agua.

El riesgo operativo surge cuando la falta de agua, la disminución de la presión o el deterioro de la calidad impiden mantener la producción. Sus efectos son especialmente graves cuando el recurso es indispensable para la seguridad, la limpieza, el enfriamiento o la transformación de materias primas. El impacto depende de la intensidad hídrica de cada proceso, la posibilidad de sustituir agua potable por agua tratada, la capacidad de almacenamiento y la existencia de circuitos de recirculación.

En relación con los riesgos regulatorios, deben considerarse las concesiones, los volúmenes autorizados, los permisos de descarga, las tarifas, las inspecciones y las prioridades de asignación durante emergencias. En 2022, el Gobierno Federal solicitó a los usuarios industriales y agrícolas de la zona que aportaran temporalmente volúmenes para el abastecimiento de la población del Área Metropolitana de Monterrey. Posteriormente, se estableció un plan de acción inmediata que priorizó el uso público urbano y doméstico en los municipios afectados por la baja disponibilidad de agua y la sequía (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2022a; Presidencia de la República, 2022).

Los riesgos financieros comprenden el aumento de los costos de suministro, tratamiento, almacenamiento, mantenimiento y aseguramiento, así como las pérdidas derivadas de la interrupción de la producción y de una menor atracción de inversiones. La contabilidad del capital natural ha adquirido relevancia en los mercados financieros debido al creciente interés por las dependencias y los impactos empresariales sobre la naturaleza. De acuerdo con las recomendaciones del Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD, 2023), las organizaciones deben evaluar y divulgar sus riesgos, oportunidades, impactos y dependencias relacionados con la naturaleza, incluido el agua.

El riesgo reputacional surge cuando las empresas son percibidas como usuarias excesivas, inequitativas u opacas del recurso. Una organización puede perder legitimidad si, durante una sequía, la población enfrenta

restricciones mientras las instalaciones industriales mantienen un acceso irrestricto. Los derechos de concesión no eliminan el deber de demostrar eficiencia, cumplimiento normativo, transparencia y capacidad de respuesta ante las necesidades sociales.

El riesgo de la cadena de suministro aparece cuando los proveedores dependen de fuentes ubicadas en zonas con presión hídrica. Una empresa puede haber reducido su consumo directo y, aun así, ser vulnerable a interrupciones que afecten a productores agrícolas, fabricantes de insumos, proveedores logísticos o generadores de energía. Por tanto, el análisis de riesgos debe extenderse más allá de las instalaciones propias.

La resiliencia organizacional puede entenderse como la capacidad de anticipar disrupciones, responder a ellas, recuperarse y corregir las causas de la exposición. No consiste únicamente en restablecer el estado previo a la crisis. Cuando el modelo anterior implica una dependencia excesiva del agua, pérdidas elevadas o impactos territoriales, la recuperación debe incorporar cambios tecnológicos, administrativos e institucionales.

La anticipación es la capacidad de identificar riesgos antes de que se conviertan en disrupciones. Implica dar seguimiento a la disponibilidad de las fuentes, construir escenarios climáticos, estimar la recarga de los acuíferos y otros procesos hidrológicos críticos, elaborar balances hídricos anuales y evaluar la vulnerabilidad de los proveedores. Esta capacidad permite integrar el agua en la planeación estratégica, financiera y operativa de las empresas.

La absorción es la capacidad de mantener temporalmente las funciones esenciales durante una disrupción. Se apoya en planes de emergencia, almacenamiento racional, reducción de usos no prioritarios, ajustes operativos y acuerdos de apoyo mutuo. El almacenamiento preventivo debe gestionarse de forma que no agrave la escasez para otros usuarios.

La adaptación comprende cambios en el equipamiento, los procesos, las prácticas y las decisiones de inversión para responder a condiciones climáticas variables. Incluye la detección de fugas, la instalación de sistemas de medición, la optimización de las operaciones de limpieza, la sustitución tecnológica, el tratamiento de aguas residuales y el reúso de corrientes internas. El fortalecimiento de esta capacidad permite reducir el volumen de agua necesario para producir una unidad de bienes o servicios.

La transformación supone cambios más profundos en la relación entre la empresa y el sistema hídrico local. Puede incluir proyectos compartidos de tratamiento, conservación de fuentes, restauración de ecosistemas, reducción de fugas y desarrollo de infraestructura. El objetivo no es solo proteger el suministro propio, sino también disminuir la fragilidad del territorio en el que se desarrollan las operaciones.

La economía circular del agua proporciona una base complementaria. A diferencia del modelo lineal de extracción, uso y desecho, la circularidad busca reducir el consumo, prolongar el tiempo de utilización, recuperar recursos y contribuir a la regeneración de los sistemas naturales. Puede aplicarse mediante la separación de corrientes, la recirculación, el tratamiento diferenciado y el uso de agua regenerada en procesos que no requieren calidad potable (Morseletto et al., 2022).

La circularidad puede fortalecer la resiliencia porque reduce la dependencia de fuentes externas. Sin embargo, no garantiza por sí sola la sostenibilidad. Los sistemas de tratamiento y recirculación requieren energía, reactivos, personal especializado y mantenimiento continuo. Bouziotas et al. (2023) señalan que las estrategias circulares deben someterse a pruebas de estrés e incertidumbre para verificar su capacidad de mantener el desempeño durante las interrupciones.

La gobernanza colaborativa constituye una perspectiva más amplia. La gestión del agua involucra autoridades, organismos operadores, empresas, productores, comunidades, universidades y organizaciones de la sociedad civil. Los riesgos no se limitan a fronteras administrativas o corporativas, sino que se configuran en cuencas, acuíferos y redes de suministro. En consecuencia, ninguna organización puede garantizar por sí sola la seguridad hídrica de un territorio.

La colaboración público-privada puede aportar financiamiento, tecnología, innovación y capacidad de ejecución. No obstante, la autoridad pública debe conservar las facultades de regulación, supervisión, protección de los usuarios y definición de prioridades. La participación empresarial se justifica cuando genera beneficios públicos verificables para el sistema compartido, no cuando asegura únicamente el acceso exclusivo de determinadas empresas.

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental de carácter integrador. Este enfoque permitió relacionar aportes de la seguridad hídrica, la gestión empresarial, la resiliencia organizacional, la economía circular y la gobernanza colaborativa.

La revisión comprendió artículos científicos, documentos oficiales, informes técnicos, estadísticas económicas, normativa e informes institucionales publicados principalmente entre 2021 y 2026. Se priorizaron materiales relacionados con la crisis hídrica de Nuevo León, la gestión empresarial del agua, los riesgos derivados de las sequías y las estrategias de adaptación aplicables a regiones industrializadas.

Los criterios de inclusión fueron la actualidad y pertinencia de las publicaciones, la claridad metodológica y su procedencia académica u oficial. Se excluyeron materiales sin autoría identificable, artículos de opinión sin respaldo documental y textos que no guardaban relación directa con el sector empresarial o con el contexto de Nuevo León.

La información se organizó en tres dimensiones analíticas. La primera fue la configuración del riesgo, mediante los peligros, la exposición, la vulnerabilidad y las capacidades de respuesta. La segunda comprendió las capacidades empresariales de anticipación, absorción, adaptación y transformación. La tercera distinguió tres niveles de intervención: las instalaciones industriales, las cadenas de suministro y el territorio hídrico compartido.

El análisis se realizó mediante la identificación y comparación de categorías recurrentes y la construcción de vínculos conceptuales entre los temas examinados. Los resultados no corresponden a mediciones directas en empresas específicas, sino a una síntesis interpretativa orientada a proponer un marco de resiliencia aplicable al sector industrial de Nuevo León.

Una limitación importante es la falta de información pública estandarizada sobre el uso real del agua, el reúso y las descargas de empresas específicas. Para sustentar esta apreciación se contrastaron los Censos Económicos 2024 del INEGI; documentos y comunicaciones oficiales de la Comisión Nacional del Agua de 2022 relativos a la emergencia hídrica, la participación de usuarios industriales y el Acueducto El Cuchillo II; la

declaratoria de emergencia por sequía del Gobierno de Nuevo León de 2022 y documentos estatales posteriores; el informe corporativo de agua de CDP (2023); y literatura científica sobre la crisis hídrica de Monterrey, los recursos del acuífero, la escasez socioeconómica y el riesgo hídrico empresarial. Estas fuentes permiten caracterizar el contexto hídrico, económico e institucional, pero no proporcionan una serie pública homogénea, comparable y por instalación que integre extracción o suministro efectivo, consumo, reúso y descarga de empresas específicas.

Resultados

La revisión permite concluir que el riesgo hídrico industrial es sistémico en Nuevo León. La sequía constituye un peligro relevante, pero sus repercusiones dependen de la disponibilidad, la demanda, la infraestructura, la urbanización, la regulación y la capacidad institucional. La crisis de 2022 puede interpretarse, a la luz del concepto de sequía socioeconómica empleado por Magaña et al. (2021), como el resultado de la interacción entre una reducción de la disponibilidad, una demanda elevada y vulnerabilidades acumuladas del sistema de abastecimiento.

Esta interpretación evita atribuir la crisis exclusivamente al cambio climático. La variabilidad de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas afectan la disponibilidad, pero la magnitud de los impactos también depende de la planeación territorial, el mantenimiento de las redes, la diversificación de las fuentes y los patrones de consumo. Tampoco resulta suficiente responsabilizar de manera general a una categoría de usuarios. El análisis debe considerar los volúmenes, las fuentes, los periodos de consumo, las necesidades de calidad, los flujos de retorno, la recirculación y el comportamiento de los actores durante los periodos de máxima demanda.

La exposición varía entre sectores y procesos. Una instalación que utiliza un volumen reducido puede enfrentar un riesgo elevado si el agua es indispensable para una etapa crítica. Otra que consume más, pero dispone de sistemas de recirculación, tratamiento y adaptación, puede reducir la probabilidad de interrupción. Por ello, debe evaluarse la dependencia funcional y no solo el volumen total.

El balance hídrico debe ser el primer paso del análisis empresarial. Debe identificar las entradas, los usos, las pérdidas, la evaporación, la incorporación al producto, la recirculación y las descargas. Los indicadores de intensidad hídrica deben complementarse con el volumen total, el porcentaje de reúso, el costo del agua por unidad producida, la calidad del efluente y el grado de presión sobre las fuentes locales.

La primera capacidad identificada es la anticipación. Las empresas necesitan sistemas de información que integren datos climáticos, niveles de almacenamiento, disponibilidad de las fuentes, condiciones de las redes y proyecciones de demanda. El agua debe incorporarse a las decisiones de los órganos de gobierno, las áreas financieras, las unidades de riesgo y las direcciones de operaciones.

La anticipación también exige la planeación de escenarios. El consumo medio anual es insuficiente para evaluar la exposición. Deben considerarse reducciones de presión, interrupciones prolongadas, restricciones regulatorias, alteraciones de la calidad y aumentos temporales de la demanda. Estos escenarios permiten identificar servicios críticos, tiempos máximos tolerables de inactividad, costos potenciales y opciones técnicamente viables.

La segunda capacidad es la absorción. Durante una emergencia es necesario proteger al personal, mantener los procesos esenciales y evitar consumos innecesarios. Los planes de continuidad deben definir prioridades, ajustes de turnos, canales de comunicación y mecanismos de apoyo mutuo entre empresas. Estas medidas deben impedir respuestas improvisadas o la adquisición de agua a proveedores no regulados.

La tercera capacidad es la eficiencia hídrica. Entre las medidas pertinentes se encuentran la instalación de medidores sectoriales, la reparación de fugas, el mantenimiento preventivo y la automatización de las actividades de limpieza. La eficiencia debe evaluarse mediante indicadores vinculados con la producción y con datos absolutos, pues una reducción relativa puede coexistir con un incremento del consumo total.

La cuarta capacidad es la circularidad. El reúso interno del agua tratada puede disminuir la dependencia de fuentes superficiales y subterráneas. Cuando la calidad es adecuada, el agua regenerada puede emplearse en enfriamiento, limpieza, servicios sanitarios, riego o determinados procesos.

La circularidad también puede extenderse al intercambio de agua entre empresas ubicadas en parques industriales o corredores.

El reúso requiere infraestructura de tratamiento, almacenamiento y distribución, así como reglas claras sobre calidad, rendición de cuentas, tarifas y monitoreo. Una estrategia circular no puede limitarse a incrementar el porcentaje de agua reutilizada; debe demostrar que reduce las extracciones, evita impactos adicionales y mantiene condiciones sanitarias y ambientales adecuadas.

La quinta capacidad es la diversificación responsable. La resiliencia aumenta cuando las empresas no dependen de una sola fuente, pero cada alternativa debe evaluarse a escala territorial. La perforación de nuevos pozos puede asegurar temporalmente el suministro de una instalación y, al mismo tiempo, agravar el deterioro del acuífero. Por ello, la primera opción debe ser reducir la demanda, seguida por la recirculación, el uso de agua regenerada y el aprovechamiento de agua pluvial para usos no potables.

La sexta capacidad es la colaboración. Durante la crisis de 2022 se establecieron mecanismos de coordinación entre las autoridades y los usuarios productivos para aportar temporalmente volúmenes destinados al abastecimiento público. De manera similar, la construcción del Acueducto El Cuchillo II involucró a los gobiernos federal y estatal, así como a empresas que proporcionaron materiales, equipo y capacidad de ejecución (Conagua, 2022a, 2022b).

Estas experiencias muestran que el sector privado puede movilizar recursos durante una crisis. Sin embargo, la colaboración no debe limitarse a la respuesta de emergencia. Debe orientarse también a la prevención, la reducción de pérdidas, el incremento del reúso, el monitoreo de las fuentes y la restauración de los ecosistemas.

Un ejemplo es el programa Reconectando con el Agua, desarrollado por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey y el Fondo Ambiental Metropolitano de Monterrey. El proyecto busca intervenir sectores de la red, medir los consumos y reducir el agua no contabilizada. Su relevancia radica en que canaliza recursos empresariales hacia la operación eficiente del sistema metropolitano, y no solo hacia la seguridad de instalaciones particulares (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2026b).

Las alianzas deben evaluarse mediante indicadores verificables, entre ellos los volúmenes recuperados, la reducción de pérdidas, los costos, la duración de las mejoras y el número de personas beneficiadas. También deben precisar la propiedad de la infraestructura, las responsabilidades de mantenimiento, la gestión de los datos y las salvaguardas para prevenir conflictos de interés.

La intervención en la cadena de suministro también es necesaria para la resiliencia industrial. Las grandes empresas pueden solicitar a sus proveedores información sobre consumo, disponibilidad, tratamiento, cumplimiento y continuidad. Sin embargo, la evaluación no debe convertirse en un mecanismo de exclusión. Las pequeñas y medianas empresas suelen disponer de menos recursos financieros y capacidades tecnológicas, por lo que requieren asistencia técnica, financiamiento y soluciones colaborativas.

La colaboración territorial también puede incluir la conservación de las zonas de recarga, la restauración de los ríos, la gestión de escorrentías y la infraestructura verde. Las soluciones basadas en la naturaleza pueden ayudar con la infiltración, la regulación hidrológica y la recuperación del entorno. Solo funcionan cuando los sitios se seleccionan con cuidado, las finanzas se sostienen a lo largo del tiempo, la ciencia y el monitoreo son sólidos y la participación social es profunda (Gooden y De Rosenzweig, 2023).

A partir de la revisión, se propone un modelo de resiliencia hídrica industrial compuesto por seis capacidades: anticipación, eficiencia, circularidad, diversificación responsable, colaboración territorial y transparencia. Estas capacidades deben aplicarse en tres niveles: las instalaciones, las cadenas de suministro y el territorio.

En las instalaciones, las empresas controlan los procesos, el equipamiento, el consumo y las descargas. En las cadenas de suministro, pueden identificar proveedores vulnerables y promover mejores prácticas. En el territorio, deben reconocer que comparten fuentes, infraestructura y riesgos con la población, otras actividades económicas y los ecosistemas.

Este modelo permite distinguir entre resiliencia real y resiliencia aparente. La primera consiste en mantener las operaciones con menores dependencias e impactos, al tiempo que se fortalece el sistema hídrico compartido. La segunda se presenta cuando una empresa sobrevive mediante la

transferencia de riesgos, el incremento de las extracciones, el acaparamiento preventivo o la externalización de impactos hacia otros usuarios.

La transparencia es una condición transversal. Las empresas deben divulgar datos comparables sobre extracción, consumo, reúso, descargas, riesgos y metas, sin revelar información comercialmente sensible. Las recomendaciones del TNFD ofrecen un marco para ampliar y profesionalizar la divulgación de dependencias, impactos, riesgos y oportunidades relacionados con la naturaleza, incluido el agua (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures, 2023).

La política pública puede incorporar métricas comunes, auditorías de agua, incentivos para la eficiencia, financiamiento para el reúso y mecanismos de apoyo a las pequeñas empresas. También debe establecer prioridades claras durante las crisis. El derecho humano al agua exige que los usos personales y domésticos tengan prioridad sobre los productivos.

Esta prioridad no contradice la importancia económica de la industria. Por el contrario, reconoce que el éxito empresarial depende de una población con servicios adecuados, instituciones eficaces, infraestructura funcional y comunidades capaces de participar en la gestión del recurso. La resiliencia industrial solo puede sostenerse dentro de un marco de seguridad hídrica colectiva.

Conclusiones

El riesgo hídrico industrial en Nuevo León resulta de la interacción entre las condiciones climáticas, la expansión metropolitana, el crecimiento productivo, la infraestructura, la demanda, la regulación y las capacidades institucionales. La sequía es una amenaza recurrente, pero se convierte en crisis cuando coincide con fuentes sometidas a presión, redes deterioradas, demanda creciente y respuestas tardías.

Los riesgos pueden ser físicos, operativos, regulatorios, financieros, reputacionales o relacionados con la cadena de suministro. El volumen total consumido es insuficiente para evaluarlos. También deben analizarse la procedencia del agua, la disponibilidad de la fuente, la calidad requerida, la recirculación, las descargas y las condiciones de la cuenca o del acuífero.

La anticipación, la eficiencia, la circularidad, la diversificación responsable, la colaboración territorial y la transparencia conforman las capacidades centrales de la resiliencia industrial. En las operaciones se expresan mediante medición, análisis de escenarios, mantenimiento, reúso y planes de continuidad. En el territorio requieren coordinación con autoridades, organismos operadores, otras empresas, universidades y comunidades.

Las asociaciones público-privadas pueden contribuir a cerrar brechas de infraestructura, ampliar el tratamiento y el reúso y apoyar la restauración de ecosistemas. Sin embargo, deben sujetarse a transparencia, escrutinio y evaluación independiente. La participación empresarial complementa, pero no sustituye, las funciones regulatorias y de planeación del Estado.

Una empresa resiliente no es aquella que se aísla de las crisis mediante fuentes exclusivas o mayores extracciones, sino la que mantiene sus operaciones mientras reduce su dependencia, sus pérdidas y sus impactos, y contribuye a fortalecer el sistema hídrico compartido.

La competitividad futura de Nuevo León dependerá de que el crecimiento industrial sea compatible con la disponibilidad de agua, el derecho humano al recurso y la integridad de las cuencas y los acuíferos. Las investigaciones futuras deberán evaluar la eficiencia hídrica de sectores específicos, las estrategias empresariales de reúso y los beneficios económicos, sociales y ambientales de los mecanismos de articulación público-privada.

Referencias

- Barajas Madrigal, U. A., Madrigal Barrera, J. J., García Romero, L., y Sánchez Quispe, S. T. (2024). Evaluación de los recursos hídricos en el acuífero Área Metropolitana de Monterrey en la última década y sus implicaciones en la crisis hídrica de la zona. *Ciencia Nicolaita*, (91), 69-82. <https://doi.org/10.35830/cn.vi91.791>
- Bouziotas, D., Stofberg, S., Frijns, J., Nikolopoulos, D., y Makropoulos, C. (2023). Assessing the resilience of circularity in water management: A modeling framework to redesign and stress-test regional systems under uncertainty. *Urban Water Journal*, 20(5), 532-549. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2190030>
- CDP. (2023). Stewardship at the source: Global water report 2023. CDP Worldwide.
- Comisión Nacional del Agua. (2022a, 28 de junio). Gobierno de México exhorta a industriales y agricultores de Monterrey a ceder agua temporalmente para abasto a la población. Gobierno de México.

- Comisión Nacional del Agua. (2022b, 30 de agosto). Acuerdan gobiernos de México y Nuevo León, con industriales, participantes en la construcción del Acueducto El Cuchillo II. Gobierno de México.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2022, 3 de febrero). Emite Gobierno de Nuevo León declaratoria de emergencia por sequía.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2026a, 4 de febrero). Fortalece Nuevo León su liderazgo industrial con el arranque de Expo Manufactura 2026.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2026b, 24 de mayo). Firman Agua y Drenaje y Fondo Ambiental Metropolitano de Monterrey convenio para fortalecer el programa Reconectando con el Agua.
- Gooden, J., y De Rosenzweig, L. J. (2023). Nature-based solutions to improve water security in northern Mexico. *Oryx*, 57(3), 286-287. <https://doi.org/10.1017/S0030605323000261>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Censos Económicos 2024: Resultados definitivos. INEGI.
- Magaña, V., Herrera, E., Ábrego-Góngora, C. J., y Ávalos, J. A. (2021). Socioeconomic drought in a Mexican semi-arid city: Monterrey Metropolitan Area, a case study. *Frontiers in Water*, 3, Article 579564. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.579564>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Pacheco-Treviño, S., y Manzano-Camarillo, M. G. (2024). The socioeconomic dimensions of water scarcity in urban and rural Mexico: A comprehensive assessment of sustainable development. *Sustainability*, 16(3), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/su16031011>
- Presidencia de la República. (2022, 29 de julio). Decreto por el que se establece el plan de acción inmediata para atender la emergencia por el desabasto de agua potable para uso público urbano y doméstico en los municipios afectados por baja disponibilidad en sus fuentes de abastecimiento y por sequía. Diario Oficial de la Federación.
- Taskforce on Nature-related Financial Disclosures. (2023). Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures. TNFD.
- Zhu, Y., Zhang, C., Wang, T., y Miao, Y. (2024). Corporate water risk: A new research hotspot under climate change. *Sustainable Development*, 32(3), 2623-2637. <https://doi.org/10.1002/sd.2800>

2. Baja California: desalación y alianzas público-privadas para la seguridad hídrica*

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.02>

Resumen

Baja California presenta condiciones de aridez, precipitaciones escasas y una demanda creciente sobre los acuíferos derivada del crecimiento urbano y productivo. Además, varias zonas dependen de fuentes externas de abastecimiento. En este contexto, la desalación de agua de mar se plantea como una alternativa para diversificar el suministro de las ciudades costeras. El objetivo del capítulo es examinar, mediante una investigación teórica y documental, las condiciones necesarias para desarrollar proyectos de desalación a través de alianzas público-privadas orientadas a la seguridad hídrica. La revisión integra aportes sobre seguridad hídrica, innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental, valor público y asignación contractual de riesgos. Los resultados muestran que la viabilidad de estos proyectos depende no solo de su capacidad de producción, sino también del consumo energético, la gestión de la salmuera, la confiabilidad operativa, la eficiencia de costos, la transparencia contractual y la rendición de cuentas. Se concluye que la desalación puede fortalecer la resiliencia hídrica de Baja California cuando forma parte de una estrategia que incluye reducción de pérdidas, reúso de aguas residuales, protección de los acuíferos y gestión de la demanda.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en ciencias administrativas. Profesor-investigador de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; Scopus ID: 571 97809938 ; correo: jasilva@ipn.mx

Palabras clave: *desalación, seguridad hídrica, alianzas público-privadas, infraestructura hídrica.*

Introducción

Las condiciones territoriales y climáticas de Baja California dificultan la disponibilidad continua de agua. La aridez, la baja precipitación, las altas tasas de evaporación y el carácter efímero de numerosos cuerpos superficiales limitan las posibilidades de abastecimiento mediante fuentes convencionales. Estas condiciones se agravan por el crecimiento poblacional y urbano, las actividades industriales, el turismo, la agricultura de riego y el deterioro de algunos acuíferos, lo que ha incrementado la presión sobre los sistemas estatales de suministro (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2024).

El reto hídrico no se manifiesta de manera uniforme en todo el estado. Mexicali depende en gran medida del río Colorado, mientras que Tijuana, Tecate, Playas de Rosarito y Ensenada reciben agua mediante combinaciones variables de fuentes subterráneas, transferencias regionales y fuentes superficiales de alcance limitado. Esta diversidad territorial impide aplicar una solución única y exige analizar las fuentes disponibles, la infraestructura existente y los patrones de demanda de cada municipio (Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

La dependencia del río Colorado constituye un factor de vulnerabilidad para Baja California. La reducción de los escurrimientos, las sequías prolongadas, los efectos del cambio climático y los compromisos de distribución binacional pueden afectar el suministro urbano, industrial y agrícola. Además, trasladar agua desde Mexicali hacia la costa requiere infraestructura de bombeo y conducción con elevados costos energéticos, operativos y financieros (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; UNESCO, 2024).

En las regiones costeras, los acuíferos son una fuente fundamental, pero su sobreexplotación puede provocar abatimiento de niveles, deterioro de la calidad y salinización. El Programa Estatal Hídrico 2022-2027 identifica acuíferos deficitarios y señala la necesidad de complementar las nuevas fuen-

tes con eficiencia, saneamiento, reúso y protección ambiental. La desalación se reconoce como una alternativa para fortalecer el abastecimiento costero, aunque su implementación requiere salvaguardas técnicas, financieras, ambientales y sociales (Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

La información oficial sobre disponibilidad muestra restricciones para incrementar las extracciones subterráneas. Se han registrado balances negativos en los acuíferos de Ensenada, Guadalupe, Camalú, Colonia Vicente Guerrero y La Trinidad. Un modelo basado en nuevas perforaciones podría aumentar la presión sobre fuentes deterioradas y favorecer procesos de salinización e intrusión marina en los sistemas costeros (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024).

Ante estas condiciones, la desalación de agua de mar constituye una alternativa para diversificar las fuentes. Su principal ventaja es que utiliza un recurso cuya disponibilidad no depende directamente de las precipitaciones ni de la recarga de los acuíferos en el corto plazo. Esta característica resulta especialmente relevante para ciudades costeras afectadas por sequías, agotamiento de fuentes subterráneas y limitaciones de los sistemas regionales de transferencia (Cai et al., 2023; Soni et al., 2025).

La desalación no elimina el riesgo hídrico, sino que sustituye parte de la dependencia climática por dependencias tecnológicas, energéticas, financieras y ambientales. Aunque el agua puede producirse de manera relativamente constante, se requieren electricidad, sistemas de bombeo, membranas, productos químicos, personal especializado, mantenimiento y tuberías de conducción. Además, el proceso genera salmuera con alta concentración de sales, cuya gestión debe evitar impactos sobre los ecosistemas marinos (Almasoudi y Jamoussi, 2024; Ogunbiyi et al., 2021).

El caso de Ensenada constituye un antecedente relevante. La planta desalinizadora se desarrolló mediante un esquema de alianza público-privada que incluyó el proyecto ejecutivo, la construcción, el suministro de equipos, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento. La instalación, con capacidad nominal de 250 litros por segundo, inició operaciones en 2018. Su incorporación amplió el portafolio de fuentes, aunque el sistema continuó requiriendo rehabilitación, interconexión, almacenamiento y mejoras en la distribución (Fondo Nacional de Infraestructura [Fonadin], 2021; Gobierno del Estado de Baja California, 2023). En este capítulo, la planta

desalinizadora de Ensenada constituye el antecedente concreto utilizado para examinar la aplicación de la desalación mediante una alianza público-privada en Baja California. Las demás referencias a esta tecnología se presentan como análisis general de sus condiciones de viabilidad y no como evaluación empírica de otras plantas del estado.

Las plantas desalinizadoras pueden requerir inversiones superiores a la capacidad presupuestaria inmediata de los organismos públicos. Por ello, las alianzas público-privadas se consideran un mecanismo para movilizar capital, integrar tecnología y distribuir responsabilidades. El socio privado puede asumir funciones de financiamiento, diseño, construcción, operación y mantenimiento, mientras que el sector público conserva la planeación, la regulación, la supervisión y la protección de los usuarios (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Una alianza público-privada no garantiza por sí misma resultados superiores a los de la inversión pública convencional. Los contratos de largo plazo pueden generar rigidez, pasivos fiscales, asimetrías de información y dependencia del operador. La literatura sobre alianzas público-privadas advierte que, cuando los riesgos se asignan de manera deficiente, el sector público puede absorber determinados sobrecostos o variaciones de demanda mientras el operador privado conserva ingresos contractualmente protegidos. (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

El capítulo analiza las condiciones tecnológicas, económicas, ambientales, institucionales y sociales necesarias para que la desalación contribuya a la seguridad hídrica de Baja California mediante alianzas público-privadas. La pregunta que orienta el estudio es la siguiente: ¿bajo qué condiciones puede una alianza de este tipo generar valor público, garantizar la viabilidad de una planta desalinizadora y reducir la vulnerabilidad hídrica sin trasladar costos y riesgos desproporcionados al Estado, los usuarios o los ecosistemas?

El argumento central sostiene que una planta desalinizadora no puede evaluarse únicamente por su capacidad nominal. Deben considerarse la cantidad, la calidad y la continuidad del suministro; el costo por metro cúbico; el consumo energético; la gestión de la salmuera; la asignación contractual de riesgos; y su relación con otras estrategias de gestión. Con base en la literatura revisada, los autores sostienen que la desalación resulta más

adecuada cuando forma parte de una política integrada y no desplaza la reducción de fugas, el reúso de aguas residuales, la protección de los acuíferos ni la gestión de la demanda (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; UNESCO, 2024).

Aproximación teórica y conceptual

La seguridad hídrica puede entenderse como la capacidad de una sociedad para disponer de agua suficiente y de calidad adecuada, sostener un desarrollo económico equitativo, proteger los medios de vida y conservar los ecosistemas frente a la variabilidad climática. El concepto integra dimensiones ambientales, sociales, económicas e institucionales, por lo que no puede alcanzarse únicamente mediante la ampliación de la oferta (UNESCO, 2024).

La seguridad hídrica debe considerar simultáneamente la disponibilidad, la calidad, la continuidad, la accesibilidad, la asequibilidad y la resiliencia de los sistemas. La existencia de una fuente adicional no garantiza un acceso efectivo cuando las redes presentan fugas, baja presión, almacenamiento insuficiente o problemas de operación y mantenimiento (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; UNESCO, 2024).

La desalación es el proceso mediante el cual se eliminan sales y otros componentes del agua de mar o del agua salobre para obtener agua con características adecuadas para un uso determinado. Las tecnologías se dividen principalmente en procesos térmicos y de membrana. Los primeros utilizan evaporación y condensación; los segundos emplean barreras selectivas y presión para separar las sales disueltas (Almasoudi y Jamoussi, 2024; Cai et al., 2023).

La ósmosis inversa se ha convertido en una de las tecnologías más utilizadas para desalar agua de mar. El proceso hace pasar el agua a través de membranas semipermeables que retienen la mayor parte de las sales. Su expansión se relaciona con mejoras en la eficiencia energética, el pretratamiento, la recuperación de presión, la automatización y la vida útil de las membranas (Cai et al., 2023; Soni et al., 2025).

Una planta de ósmosis inversa comprende etapas de captación, pretratamiento, bombeo de alta presión, separación por membranas, recuperación de energía, postratamiento y disposición de la salmuera. Cada etapa influye en los costos, la calidad del agua, el consumo energético y los posibles impactos ambientales. El desempeño depende, entre otros factores, de la salinidad, la temperatura, el diseño de la captación, la calidad del pretratamiento, la tasa de recuperación y el mantenimiento (Almasoudi y Jamoussi, 2024; Cai et al., 2023).

La diversificación mediante desalación reduce la dependencia de las precipitaciones en el corto plazo. Sin embargo, la infraestructura sigue expuesta a cortes de energía, fallas de tuberías, necesidades de mantenimiento, floraciones algales nocivas, contaminación de la captación y escasez de repuestos o personal especializado. Por ello, la resiliencia debe evaluarse para el sistema completo y no únicamente para la planta (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; Soni et al., 2025).

El sistema incluye también estaciones de bombeo, reservorios, tuberías de conducción y la red urbana. Una falla en cualquiera de estos componentes puede restringir la entrega, incluso cuando la planta continúa produciendo. En consecuencia, el análisis de resiliencia debe abarcar todo el sistema de abastecimiento (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; Soni et al., 2025).

Uno de los principales desafíos de la desalación es el consumo de energía. La electricidad representa una parte significativa de los costos debido a la presión necesaria para separar las sales. Aunque los sistemas de recuperación de energía y las membranas modernas han reducido esta demanda, la desalación de agua de mar continúa siendo más intensiva en energía que el tratamiento de numerosas fuentes superficiales o de aguas residuales municipales (Cai et al., 2023; Shokri y Sanavi Fard, 2022).

La dependencia energética genera riesgos financieros por la volatilidad de los precios y riesgos ambientales cuando la electricidad procede de combustibles fósiles. La incorporación de energías renovables puede reducir estos impactos, pero requiere considerar la intermitencia, el almacenamiento, el respaldo y la estabilidad operativa (Shokri y Sanavi Fard, 2022).

El potencial solar de Baja California ofrece oportunidades para establecer contratos de suministro renovable y sistemas híbridos. No obstante, los paneles solares por sí solos no garantizan la operación continua de una planta. La generación renovable debe integrarse a la red, respaldarse mediante almacenamiento u otras fuentes y diseñarse para mantener la estabilidad del abastecimiento urbano (Shokri y Sanavi Fard, 2022; Soni et al., 2025).

La descarga de salmuera representa otro desafío. El proceso produce una corriente con una concentración de sales superior a la del agua de mar de origen y puede contener residuos de los productos químicos utilizados en el pretratamiento, la limpieza de membranas y el control biológico. Una descarga sin dispersión suficiente puede alterar la salinidad, la temperatura y la composición química del entorno local (Gupta et al., 2025; Panagopoulos y Haralambous, 2020).

Los impactos varían según el volumen y la concentración de la descarga, las corrientes, la profundidad, la temperatura y la sensibilidad de los ecosistemas. Los organismos bentónicos, la vegetación marina y otras especies con movilidad limitada presentan una mayor exposición. Las zonas con poca circulación o con varias descargas cercanas poseen un mayor potencial de impactos acumulativos y requieren especial atención (Gupta et al., 2025; Panagopoulos y Haralambous, 2020).

Las alternativas para gestionar la salmuera incluyen la descarga mediante difusores, la dilución controlada, la recuperación adicional de agua, la concentración, la cristalización y la recuperación de minerales. Todas estas opciones implican costos, consumo de energía y generación de residuos. Los sistemas de descarga líquida cero pueden reducir los vertidos, pero presentan elevados requerimientos energéticos y producen residuos sólidos que deben manejarse adecuadamente (Ogunbiyi et al., 2021).

La elección de una estrategia debe basarse en evaluaciones ambientales y de ciclo de vida. Reducir la descarga de salmuera no es suficiente si la alternativa incrementa considerablemente las emisiones, el consumo energético o la generación de residuos. La sostenibilidad exige evitar la transferencia de impactos de un medio ambiental a otro (Almasoudi y Jamoussi, 2024; Ogunbiyi et al., 2021).

Los sistemas de captación marina también pueden generar impactos. Las tomas abiertas pueden atrapar o arrastrar organismos, mientras que las captaciones subsuperficiales ofrecen cierta filtración natural y características ambientales distintas. Su viabilidad depende de las condiciones geológicas, el caudal requerido y los costos, además de su posible interacción con los acuíferos costeros (Almasoudi y Jamoussi, 2024; Soni et al., 2025).

La desalación suele presentar costos de capital y operación superiores a los de numerosas fuentes convencionales. Deben considerarse la construcción, la energía, los productos químicos, el reemplazo de membranas, el personal, la supervisión ambiental, las tuberías de conducción, los tanques de almacenamiento y las obras necesarias para integrar el agua producida a la red (Cai et al., 2023; Soni et al., 2025).

Los costos de producción dependen de componentes civiles y electromecánicos, la formación de incrustaciones, la tecnología utilizada, la salinidad, la altura y distancia de bombeo, la eficiencia energética y las condiciones financieras locales. Una instalación sobredimensionada que opere por debajo de su capacidad puede producir agua a un costo excesivo, mientras que una instalación subdimensionada puede no generar los beneficios esperados (Cai et al., 2023).

Una alianza público-privada es una relación contractual de largo plazo en la que una entidad privada asume responsabilidades significativas de financiamiento, diseño, construcción, operación o mantenimiento para proporcionar infraestructura o servicios. La remuneración puede provenir de pagos públicos, tarifas, ventas de agua o una combinación de mecanismos (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

A diferencia de la contratación tradicional, una alianza puede integrar varias fases del ciclo de vida. La empresa que construye y opera la planta durante un periodo prolongado tiene incentivos para adoptar un diseño que reduzca los costos de mantenimiento, siempre que el contrato vincule su remuneración con indicadores de disponibilidad, calidad, eficiencia y conservación de la infraestructura (Lima et al., 2021).

La evidencia indica que los resultados de las alianzas público-privadas en el sector hídrico dependen de la capacidad institucional, la competencia, la regulación, la transparencia y la asignación de riesgos. No existe evidencia suficiente para afirmar que la participación privada sea intrínsecamente más

eficiente que la gestión pública. Los beneficios esperados pueden no materializarse cuando existen contratos opacos, garantías públicas excesivas o una supervisión gubernamental insuficiente (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

La asignación contractual de riesgos constituye un principio fundamental. Cada riesgo debe recaer en la parte con mayor capacidad para prevenirlo, controlarlo, mitigarlo o absorberlo a un costo razonable. Una transferencia excesiva al socio privado puede encarecer el contrato, mientras que una retención excesiva por parte del Estado puede eliminar la justificación económica de la alianza (Global Infrastructure Hub, 2020).

Los riesgos de diseño, construcción y desempeño operativo pueden asignarse principalmente a la empresa, porque esta controla las decisiones correspondientes. El riesgo de disponibilidad puede vincularse con pagos condicionados a la entrega efectiva del agua y al cumplimiento de indicadores de desempeño previamente establecidos (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

El riesgo energético requiere fórmulas específicas. Si una empresa asume durante décadas toda la volatilidad futura del precio de la electricidad, probablemente incorporará una prima de riesgo elevada o buscará renegociar el contrato. Si el Estado compensa cualquier aumento, el operador pierde incentivos para mejorar la eficiencia. Una distribución equilibrada puede utilizar bandas de variación, metas de consumo y mecanismos para compartir costos y beneficios (Global Infrastructure Hub, 2020).

El riesgo de demanda también debe analizarse. Un contrato que obligue al organismo público a comprar toda la capacidad disponible puede generar pagos por agua que no se utiliza. En cambio, un esquema basado únicamente en el volumen consumido puede dificultar el financiamiento. Una alternativa es combinar un pago por disponibilidad con un componente variable asociado con el volumen efectivamente entregado (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

El desempeño financiero constituye solo una parte del valor público. Un proyecto genera valor cuando mejora la continuidad, la calidad y el acceso; reduce la presión sobre fuentes frágiles; protege el ambiente; y utiliza eficientemente los recursos públicos. Estas dimensiones deben evaluarse junto con

los costos monetarios, los objetivos y los resultados de la alianza al compararla con la contratación tradicional (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

La asequibilidad debe ocupar un lugar central en el análisis. El costo del agua desalinizada puede elevar las tarifas necesarias para recuperar la inversión y la operación, lo que afecta de manera desproporcionada a los hogares de menores ingresos. Si el Estado absorbe la totalidad del costo, puede comprometer la sostenibilidad fiscal del servicio (UNESCO, 2024).

Los subsidios deben diseñarse de manera transparente y focalizada. Una estructura tarifaria progresiva puede proteger el consumo básico y cobrar más a los usuarios con consumos superiores. También es necesario identificar qué sectores generan el crecimiento de la demanda. El turismo, los desarrollos industriales y el sector inmobiliario que se benefician de la nueva infraestructura deben asumir una parte proporcional de sus costos (UNESCO, 2024).

La gobernanza de una alianza comprende transparencia, participación, regulación y rendición de cuentas. Los contratos deben establecer parámetros de calidad y continuidad, indicadores de eficiencia energética y desempeño ambiental, así como reglas para las modificaciones, la terminación anticipada, la resolución de controversias y la transferencia de activos (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

Los compromisos fiscales, las garantías y los mecanismos de pago deben ser públicos. Las obligaciones presupuestarias y los criterios de desempeño no deben ocultarse mediante cláusulas de confidencialidad comercial. Además, se requieren equipos públicos con capacidad técnica, financiera, jurídica y ambiental para reducir las asimetrías de información frente al operador privado (Lima et al., 2021).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental de naturaleza cualitativa. La revisión integró estudios sobre seguridad hídrica, ingeniería de desalación, gestión ambiental, economía de la infraestructura y alianzas público-privadas.

Los documentos analizados incluyeron artículos científicos, instrumentos de planeación, información oficial sobre la disponibilidad de los acuíferos, fichas de infraestructura y literatura publicada principalmente entre 2020 y 2025. Se incorporaron materiales anteriores cuando resultaron necesarios para explicar antecedentes o conceptos.

La búsqueda se realizó con palabras clave relacionadas con desalación, ósmosis inversa, seguridad hídrica, salmuera, energía renovable, conducción de agua, asociaciones público-privadas, asignación de riesgos, Ensenada y Baja California. También se utilizaron términos equivalentes en inglés para ampliar la cobertura de la literatura académica.

Los criterios de inclusión fueron la relación con la pregunta de investigación, la actualidad, la procedencia académica o gubernamental y la claridad metodológica. Se excluyeron textos promocionales, opiniones sin sustento documental y materiales que presentaban la desalación como una solución universal sin comparar sus costos, impactos ambientales y requerimientos institucionales.

La información se organizó en cinco categorías: contribución a la seguridad hídrica; viabilidad tecnológica y energética; impacto ambiental; arreglos contractuales y financieros; y gobernanza. Estas categorías permitieron relacionar la dimensión técnica con el contexto institucional y social de los proyectos.

El debate conceptual se aplicó al caso de la planta desalinizadora en Ensenada. La revisión se centró en su tamaño, método de entrega y papel en el sistema de suministro de agua. No se realizó una revisión contractual detallada porque no se dispuso de datos de pago completos y uniformes, costos de ejecución actualizados, cambios contractuales, datos operativos de energía e información sobre desempeño ambiental.

Los resultados corresponden a una síntesis interpretativa. No sustituyen los estudios detallados de viabilidad técnica, económica, ambiental y social requeridos para proyectos específicos. Su finalidad es proponer criterios generales sobre cuándo se justifica una planta desalinizadora y cómo debe estructurarse una alianza público-privada.

Resultados

El análisis muestra que la desalación puede contribuir a la seguridad hídrica de Baja California, aunque su pertinencia depende del contexto territorial. Resulta especialmente relevante para ciudades costeras con sequías recurrentes, restricciones para incrementar la extracción subterránea, medidas previas de gestión de la demanda y capacidad para integrar el agua producida a los sistemas existentes (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; Soni et al., 2025).

La principal ventaja es la diversificación. Una ciudad que combina acuíferos, trasvases, reúso y desalación reduce su dependencia de una sola fuente. Esta configuración puede disminuir la exposición a sequías, interrupciones de acueductos o limitaciones en la disponibilidad del río Colorado, aunque requiere coordinar sistemas con costos y características operativas diferentes (Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

La planta desalinizadora de Ensenada aportó una fuente adicional con capacidad nominal de 250 litros por segundo. Su suministro complementa, pero no sustituye, a las demás fuentes y puede adquirir valor estratégico durante periodos de escasez. El caso demuestra que la desalación puede integrarse a un sistema urbano, pero también que el desempeño depende de la conducción, el almacenamiento y la distribución, además de la operación de la planta (Fonadin, 2021; Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

El primer criterio para justificar un proyecto es demostrar su necesidad. Las autoridades deben elaborar balances realistas entre oferta y demanda, examinar el crecimiento urbano y modelar los efectos de las sequías antes de construir una planta. No debe sobredimensionarse la capacidad con base en proyecciones de crecimiento sin incorporar mecanismos eficaces de gestión de la demanda (UNESCO, 2024).

El segundo criterio es la comparación con alternativas. La desalación debe evaluarse frente a la reducción de fugas, la medición, la gestión de la demanda, el tratamiento y reúso de aguas residuales y la rehabilitación de fuentes existentes. En determinados contextos, recuperar el agua que se pierde puede resultar menos costoso y menos intensivo en energía que

desalar agua de mar (Gobierno del Estado de Baja California, 2023; UNESCO, 2024).

El reúso merece especial consideración. Las aguas residuales tratadas pueden destinarse a aplicaciones industriales, agrícolas, comerciales y urbanas que no requieren calidad potable. Esta sustitución permite reservar agua de mayor calidad para el consumo humano y puede implicar menores requerimientos energéticos que la desalación, según la calidad del efluente y el tratamiento necesario (Cai et al., 2023; Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

El tercer criterio es la adicionalidad. La nueva fuente debe reducir de manera material la vulnerabilidad del sistema. El agua desalinizada aporta mayor valor cuando permite sustituir extracciones subterráneas o disminuir la dependencia de fuentes importadas, y no cuando solo sostiene un crecimiento adicional de la demanda. El proyecto debe vincularse con metas verificables de sustitución, recuperación o conservación de fuentes (UNESCO, 2024).

El cuarto criterio es la modularidad. El desarrollo por etapas permite ajustar la capacidad a la demanda efectiva, disminuye el riesgo de pagar por infraestructura ociosa y facilita la incorporación de innovaciones tecnológicas. También permite evaluar el desempeño operativo y ambiental antes de ampliar el proyecto (Soni et al., 2025).

El quinto criterio es la confiabilidad. Los contratos deben especificar la disponibilidad, la cantidad y calidad del agua, el consumo de energía, el mantenimiento y los tiempos de recuperación. Una planta no debe considerarse exitosa solamente porque alcance ocasionalmente su capacidad nominal; importa el volumen efectivamente entregado durante el año y, en particular, en los periodos de máxima demanda (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

Cuando resulte pertinente, el socio privado puede asumir el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento. Esta integración mejora la coordinación entre las fases, pero debe acompañarse de penalizaciones por retrasos, fallas o incumplimientos. La remuneración debe vincularse con resultados verificables y no solo con la existencia física de la infraestructura (Lima et al., 2021).

El pago por capacidad puede proporcionar certidumbre de ingresos y preservar el incentivo para mantener la planta disponible. Debe efectuarse plenamente solo cuando la instalación esté lista y opere dentro de los parámetros contractuales. El esquema puede incorporar deducciones por fallas atribuibles al operador y un componente variable asociado con el volumen solicitado y efectivamente entregado (Global Infrastructure Hub, 2020).

La calidad del agua debe medirse en el punto de entrega. El contrato debe definir los parámetros, la frecuencia de muestreo, los procedimientos y la responsabilidad de cada parte. La red de distribución continúa bajo la responsabilidad del operador público, mientras que la parte privada responde por la calidad producida y entregada en el punto contractual (Lima et al., 2021).

Los indicadores de desempeño deben incluir el consumo energético, expresado, por ejemplo, en kilovatios-hora por metro cúbico producido. Los ahorros derivados de una mayor eficiencia pueden compartirse entre el operador y el organismo público para mantener incentivos a la innovación sin eliminar los beneficios para las finanzas públicas (Cai et al., 2023; Shokri y Sanavi Fard, 2022).

El abastecimiento con energía renovable puede reducir la huella climática y la vulnerabilidad ante cambios en los precios de los combustibles. Sin embargo, su procedencia debe demostrarse mediante mecanismos verificables y el sistema debe contar con respaldo suficiente para mantener la operación cuando disminuya la generación renovable, como señalan Shokri y Sanavi Fard (2022).

La gestión de la salmuera debe establecerse como una obligación permanente de desempeño y no limitarse a una condición inicial de autorización. Se requiere monitorear la salinidad, la temperatura, los productos químicos y las variables biológicas en la zona de descarga. Los resultados deben ser revisados por la autoridad y publicados para fortalecer la rendición de cuentas (Gupta et al., 2025; Panagopoulos y Haralambous, 2020).

Los impactos acumulativos deben incorporarse a la evaluación. Cada descarga no puede analizarse de manera aislada cuando existen o se proyectan varias plantas en un mismo corredor costero. El gobierno estatal debe evaluar la capacidad de carga del ecosistema, ordenar la localización de los

proyectos y establecer sistemas coordinados de monitoreo (Gupta et al., 2025).

La asignación de riesgos debe evitar dos extremos. El primero es transferir al sector privado riesgos que no puede gestionar, lo que incrementa el precio del contrato. El segundo es garantizar todos sus ingresos y costos, porque ello reduce los incentivos para operar eficientemente (Global Infrastructure Hub, 2020).

Los riesgos de construcción, tecnología, mantenimiento y desempeño deben recaer principalmente en la empresa. Los riesgos derivados de decisiones soberanas o públicas corresponden al Estado. Los riesgos compartidos, como la energía o la demanda, requieren fórmulas equilibradas definidas desde el contrato (Global Infrastructure Hub, 2020).

La evaluación financiera debe abarcar todo el ciclo de vida. La inversión inicial es insuficiente para estimar el costo real. Deben incorporarse los pagos de largo plazo, la energía, el mantenimiento, el reemplazo de membranas, la supervisión, los subsidios públicos y los posibles costos ambientales (Cai et al., 2023; Lima et al., 2021).

El financiamiento privado suele tener un costo superior al financiamiento público. Esta diferencia debe compensarse mediante una transferencia efectiva de riesgos o una mejor operación. La conveniencia del esquema debe reevaluarse cuando una parte importante de la inversión proviene del Estado y las garantías de pago o la mayoría de los riesgos permanecen en el sector público (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Los pasivos contingentes requieren transparencia. Una garantía sin costo inmediato puede convertirse posteriormente en una obligación presupuestaria. Los proyectos deben revelar las condiciones que activarían pagos extraordinarios, rescates o compensaciones (Global Infrastructure Hub, 2020).

La asequibilidad determina la legitimidad del proyecto. El costo del agua desalinizada no debe distribuirse de manera uniforme sin considerar la capacidad de pago ni los beneficios obtenidos por cada grupo de usuarios. Los hogares deben contar con un volumen básico suficiente y asequible (UNESCO, 2024).

Los sectores que dependen de la nueva capacidad —incluidos los desarrollos inmobiliarios, hoteleros e industriales— pueden contribuir median-

te derechos de conexión, aportaciones o contratos específicos. De esta manera se evita que la población existente subsidie indiscriminadamente nuevas actividades económicas y se alinean los beneficios privados con las obligaciones de financiamiento.

La transparencia contractual constituye otra condición esencial. La población debe conocer la duración del contrato, el mecanismo de pago, las garantías, los indicadores de desempeño, las penalizaciones y los procedimientos de renegociación. La confidencialidad debe limitarse a información comercial legítima y no ocultar obligaciones fiscales ni resultados de desempeño (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

La autoridad contratante necesita capacidad técnica para supervisar el proyecto. La desalación y el financiamiento son campos complejos que pueden generar asimetrías frente al operador privado. Una agencia sin personal especializado dependerá excesivamente de la información producida por la empresa y tendrá menor capacidad para vigilar y sancionar (Lima et al., 2021).

La supervisión puede complementarse con auditorías independientes y la participación de universidades. Las instituciones académicas y de investigación pueden apoyar el monitoreo marino, la evaluación energética y el análisis del desempeño, siempre que cuenten con información suficiente sobre las dimensiones técnicas y contractuales.

La consulta social debe realizarse antes de adjudicar el proyecto. Las comunidades costeras, los pescadores, las organizaciones ambientales, los usuarios y los sectores productivos pueden aportar información sobre impactos, necesidades y alternativas. Una participación posterior a la decisión reduce su utilidad y puede incrementar el conflicto.

Los contratos también deben regular las modificaciones. Las alianzas de largo plazo requieren cierta flexibilidad, pero las condiciones surgidas de la competencia no deben transformarse mediante renegociaciones integrales. Todo cambio relevante debe explicar de manera transparente sus causas, costos, riesgos y beneficios (Global Infrastructure Hub, 2020; Lima et al., 2021).

El análisis identifica siete condiciones para que una alianza público-privada de desalación contribuya a la seguridad hídrica: necesidad demostrada, comparación con alternativas, viabilidad técnica y financiera,

sostenibilidad energética, protección ambiental, asequibilidad y gobernanza transparente.

Estas condiciones se encuentran interrelacionadas. Una planta tecnológicamente eficiente puede resultar inviable si genera costos sociales regresivos. Un contrato rentable pierde valor público cuando el ecosistema receptor no puede asimilar la descarga. Del mismo modo, un proyecto ambientalmente bien gestionado aporta poco si no disminuye la presión sobre las fuentes existentes.

La desalación debe formar parte de un portafolio amplio de soluciones para Baja California: medición, reducción de fugas, tarifas orientadas a la eficiencia, reúso, rehabilitación e interconexión de redes, protección y recarga de acuíferos y, cuando resulte pertinente, desalación. Esta combinación reduce la dependencia de una sola infraestructura y amplía la capacidad de respuesta ante distintos escenarios (Gobierno del Estado de Baja California, 2023).

También es necesario definir el destino del agua producida. Puede incorporarse al abastecimiento urbano o sustituir usos convencionales de determinados sectores productivos. Cuando la sustitución es verificable y no amplía el consumo total, esta segunda vía puede liberar agua de mayor calidad para usos prioritarios.

La planeación debe incorporar escenarios de cambio climático, crecimiento y contingencia, en lugar de limitarse a la demanda promedio. Es necesario evaluar los efectos de una falla prolongada, un aumento de los costos energéticos, una disminución de la demanda o cambios en las condiciones ambientales (Soni et al., 2025; UNESCO, 2024).

El propósito de una alianza no es eliminar el gasto público, sino estructurar capacidades privadas para alcanzar fines públicos. La infraestructura se paga finalmente mediante tarifas, impuestos, contribuciones o compromisos gubernamentales. El objetivo debe ser una combinación equilibrada de desempeño, innovación, calidad y distribución de riesgos (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Conclusiones

La inseguridad hídrica estructural de Baja California se relaciona con la aridez, la presión sobre los acuíferos, el crecimiento urbano y productivo y la dependencia de fuentes externas. La desalación constituye una alternativa legítima para diversificar el suministro de las ciudades costeras, especialmente cuando existen límites para incrementar la extracción subterránea.

La desalación no está exenta de riesgos. Reduce la dependencia de las precipitaciones, pero incrementa la dependencia de la tecnología, la energía y el capital. La abundancia de agua de mar no garantiza la continuidad del servicio, pues la infraestructura puede fallar, requerir mantenimiento o enfrentar interrupciones eléctricas y de conducción.

Los principales impactos ambientales se relacionan con la captación marina, el consumo de energía y productos químicos y la descarga de salmuera. Pueden reducirse mediante tecnologías adecuadas, diseños apropiados, incorporación verificable de energía renovable y monitoreo continuo, pero no deben minimizarse ni evaluarse de manera fragmentada.

Las alianzas público-privadas pueden movilizar inversión, tecnología y capacidades especializadas, pero sus resultados dependen de la competencia, la transparencia, una distribución equilibrada de riesgos y la capacidad gubernamental para administrar los contratos. La participación privada no exime al Estado de garantizar el derecho humano al agua ni de proteger los ecosistemas.

El precedente de Ensenada demuestra que la desalación puede incorporarse al abastecimiento urbano y ampliar el portafolio de fuentes. También evidencia que el desempeño debe evaluarse mediante la disponibilidad efectiva, los costos, el mantenimiento, la calidad del agua, el consumo energético y la integración con la red.

La planeación debe colocar la asequibilidad en primer plano. Los costos no pueden trasladarse de manera uniforme a los hogares, especialmente cuando parte de la nueva demanda procede de desarrollos inmobiliarios, turísticos o industriales. Los beneficiarios de la expansión deben asumir una proporción adecuada del financiamiento.

La desalación debe considerarse un complemento de la reducción de fugas, el reúso, la rehabilitación de redes y la protección de los acuíferos, no un sustituto de estas medidas. Construir nuevas plantas sin mejorar la eficiencia puede ampliar la oferta y, al mismo tiempo, mantener los factores estructurales que generan vulnerabilidad.

Una alianza público-privada contribuirá a la seguridad hídrica cuando exista una necesidad clara y comprobada; se compare con otras opciones; garantice la viabilidad técnica y energética; gestione los impactos ambientales; proteja la asequibilidad; y opere bajo una gobernanza transparente.

El éxito de un proyecto no se mide solo en litros. El valor público se genera mediante una planta que proporciona agua de manera confiable, reduce la presión sobre fuentes frágiles, mantiene los costos dentro de rangos socialmente aceptables y protege los ecosistemas costeros. En estas condiciones, la desalación puede formar parte de una estrategia de resiliencia hídrica para Baja California.

Referencias

- Almasoudi, S., y Jamoussi, B. (2024). Desalination technologies and their environmental impacts: A review. *Sustainable Chemistry One World*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100002>
- Cai, Y., Wu, J., Shi, S. Q., Li, J., y Kim, K.-H. (2023). Advances in desalination technology and its environmental and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136498>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2024. Diario Oficial de la Federación.
- Fondo Nacional de Infraestructura. (2021). Planta desaladora en Ensenada, Baja California. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos. <https://www.fonadin.gob.mx/fni2/fp14/>
- Global Infrastructure Hub. (2020). PPP risk allocation tool 2019 edition. <https://ppp-risk.gihub.org/>
- Gobierno del Estado de Baja California. (2023). Programa Estatal Hídrico 2022-2027. Periódico Oficial del Estado de Baja California. https://www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/coplade/planeacion/programas-estatales/Programa_Estatal_Hidrico-POE.pdf

- Gupta, P., Arciniegas-Pérez, M. D., y Barrios-Piña, H. A. (2025). Impact of brine discharge from desalination plants on marine ecosystems: A review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100693. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100693>
- Lima, S., Brochado, A., y Marques, R. C. (2021). Public-private partnerships in the water sector: A review. *Utilities Policy*, 69, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101182>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public-private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Ogunbiyi, O., Saththasivam, J., Al-Masri, D., Manawi, Y., Lawler, J., Zhang, X., y Liu, Z. (2021). Sustainable brine management from the perspectives of water, energy and mineral recovery: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105429. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105429>
- Panagopoulos, A., y Haralambous, K.-J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment: Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111773. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>
- Shokri, A., y Sanavi Fard, M. (2022). A sustainable approach in water desalination with the integration of renewable energy sources: Environmental engineering challenges and perspectives. *Environmental Advances*, 9, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.enadv.2022.100281>
- Soni, S., Jindal, M. K., Tewari, P. K., y Anand, V. (2025). Potential and challenges of desalination technologies for arid and semiarid regions: A comprehensive review. *Desalination*, 600, 118458. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118458>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz. UNESCO.

3. Sonora: minería, responsabilidad empresarial y gobernanza del agua*

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.03>

Resumen

Sonora ocupa una posición central en la minería mexicana por su producción de cobre, oro, molibdeno, grafito y otros minerales. Gran parte de la actividad extractiva se desarrolla en territorios áridos y semiáridos afectados por sequías, presión sobre los acuíferos y conflictos entre usos urbanos, agrícolas, ganaderos, ambientales y productivos. El objetivo del capítulo es examinar, mediante una investigación teórica y documental, la responsabilidad de las empresas mineras en la gestión del agua y los mecanismos de gobernanza necesarios para prevenir, controlar y remediar sus impactos. La revisión integra aportes sobre gobernanza hídrica, responsabilidad empresarial, justicia ambiental, gestión sostenible, transparencia y participación. Los resultados indican que el cumplimiento regulatorio constituye solo el nivel mínimo de responsabilidad y debe complementarse con debida diligencia, prevención, eficiencia, recirculación, monitoreo independiente, información verificable, reparación integral y planeación del cierre. Se propone un modelo basado en rectoría pública, responsabilidad empresarial, participación comunitaria efectiva y apoyo científico independiente. Se concluye que la legitimidad futura de la minería en Sonora depende de su compatibilidad con la seguridad hídrica territorial.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor-investigador de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; Scopus ID: 57197809938 ; correo: jasilva@ipn.mx

Palabras clave: *minería, gobernanza del agua, responsabilidad empresarial, justicia ambiental.*

Introducción

Sonora ocupa una posición central en el sector minero mexicano. Es el principal productor nacional de cobre y molibdeno y también alberga operaciones de oro, plata, grafito y wollastonita. Estas actividades han impulsado proveedores, empleo especializado, exportaciones e inversión en extracción y procesamiento de minerales, por lo que la minería constituye uno de los sectores estratégicos de la economía estatal (Secretaría de Economía y Turismo del Estado de Sonora, 2024).

La importancia económica de la minería podría aumentar durante las próximas décadas debido a la demanda de minerales utilizados en redes eléctricas, equipos electrónicos, sistemas de almacenamiento, vehículos eléctricos y tecnologías de generación renovable. Sin embargo, la transición energética no elimina los riesgos ambientales y sociales asociados con la extracción. Una mayor demanda de minerales puede incrementar el uso de suelo, energía y agua, la generación de residuos y la exposición de comunidades y ecosistemas a peligros mineros, aun cuando mejore la eficiencia por unidad producida (Macklin et al., 2023; Owen y Kemp, 2023).

El agua interviene en todas las etapas del ciclo de vida de una mina. Puede utilizarse en exploración, perforación, trituración, molienda, concentración, flotación, lixiviación, transporte de minerales, control de polvo, lavado de equipos y manejo de relaves. Las necesidades varían según el mineral, la escala de producción, la tecnología, el clima y la capacidad de recircular el agua dentro de los procesos (Gilsbach et al., 2022; Robertson et al., 2024).

El volumen es solo una dimensión de los impactos mineros, ya que la disponibilidad y la calidad de los recursos locales pueden verse afectadas por la extracción de aguas subterráneas, la desviación de escorrentías y las filtraciones provenientes de instalaciones de residuos. Los efectos pueden extenderse más allá del área de operación y persistir después del cierre debido a la incorporación de contaminantes en sedimentos, suelos, aguas superficiales o acuíferos (Macklin et al., 2023).

Estas relaciones adquieren especial importancia en el contexto árido y semiárido de Sonora, caracterizado por precipitaciones irregulares y presión sobre diversas fuentes subterráneas. La disponibilidad no es uniforme y varios acuíferos presentan balances negativos, lo que significa que los volúmenes comprometidos superan la disponibilidad media anual calculada. Entre ellos se encuentran Caborca, Valle de San Luis Río Colorado, Sonoyta-Puerto Peñasco, Magdalena, Busani y Coyotillo (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2023).

La presión sobre los acuíferos no puede atribuirse exclusivamente a la minería, pues también intervienen los usos agrícolas, ganaderos, urbanos, turísticos e industriales. No obstante, las operaciones mineras suelen prolongarse durante décadas, concentran extracciones localmente y generan residuos que requieren gestión y monitoreo de largo plazo. Por ello, su responsabilidad no debe evaluarse únicamente a partir de la existencia de una concesión, sino también mediante los efectos acumulativos sobre las fuentes compartidas (Conagua, 2023; Gilsbach et al., 2022).

El derrame ocurrido el 6 de agosto de 2014 en las instalaciones de Buenavista del Cobre constituye un caso central para comprender la relación entre minería, agua y responsabilidad empresarial en Sonora. El incidente liberó aproximadamente 40 mil metros cúbicos de solución de sulfato de cobre acidulado en el arroyo Tinajas, que alcanzó los ríos Bacanuchi y Sonora. La contaminación afectó a comunidades de la cuenca, restringió el uso del agua y dio lugar a medidas de emergencia, compensación e infraestructura para el abastecimiento y tratamiento (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2023).

El caso demuestra que las consecuencias de un desastre minero no concluyen con la contención inicial del derrame. Se requieren monitoreo ambiental, abastecimiento alternativo, vigilancia de la salud, estudios epidemiológicos, mantenimiento de la infraestructura y seguimiento prolongado de las actividades productivas afectadas. La evaluación del Fideicomiso Río Sonora identificó, entre otros desafíos, la complejidad técnica de las medidas, la continuidad operativa de las plantas de tratamiento y la participación comunitaria en la selección de opciones de remediación (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021).

El diagnóstico ambiental de Semarnat (2023) identificó impactos directos e indirectos y señaló que las medidas de remediación aplicadas después del derrame resultaron insuficientes, pues los efectos persisten en diversos componentes ambientales. La continuidad de las acciones gubernamentales y comunitarias confirma que los daños sociales y ambientales pueden prolongarse mucho después de la emergencia, lo que refuerza la importancia de la prevención, las garantías financieras y la responsabilidad de largo plazo (Semarnat, 2023, 2024).

El caso del río Sonora no debe interpretarse como un accidente aislado. Permite identificar debilidades en prevención, supervisión, transparencia, coordinación institucional y remediación. La posibilidad de que una falla afecte comunidades y ecosistemas situados a decenas o cientos de kilómetros demuestra que la gestión minera del agua debe realizarse a escala de cuenca y no limitarse al perímetro administrativo de cada instalación (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Macklin et al., 2023).

El capítulo analiza la responsabilidad empresarial por el agua utilizada o afectada por la minería en Sonora y propone un modelo de gobernanza que articula las funciones del Estado, las empresas, las comunidades y las instituciones científicas. La pregunta de investigación es la siguiente: ¿qué principios, capacidades y mecanismos deben integrar un sistema de gobernanza capaz de prevenir, controlar y remediar los impactos mineros en un territorio marcado por la escasez y la vulnerabilidad ambiental?

La premisa central es que la responsabilidad empresarial no puede reducirse al cumplimiento administrativo de concesiones, autorizaciones y límites de descarga. Aunque el cumplimiento constituye el punto de partida, la escala, duración y naturaleza de los impactos hacen necesaria la debida diligencia durante todo el ciclo del proyecto: prevención, transparencia, participación, reparación integral, cierre y seguimiento posterior. Esta responsabilidad no sustituye la supervisión pública, pues corresponde al Estado asignar el recurso, establecer prioridades, vigilar el cumplimiento y sancionar en defensa del interés colectivo.

Aproximación teórica y conceptual

La gobernanza del agua comprende las instituciones, reglas, actores, procesos y relaciones mediante los cuales el recurso se asigna, utiliza, conserva y protege. Este enfoque amplía la gestión pública al considerar a empresas, comunidades, organizaciones sociales, instituciones académicas y usuarios. Sin embargo, la participación de múltiples actores no implica que todos posean las mismas capacidades, derechos o responsabilidades (Jackson et al., 2023; Robertson et al., 2024).

En el ámbito minero, la gobernanza debe considerar simultáneamente la cantidad y la calidad del agua. La dimensión cuantitativa permite identificar las fuentes de suministro, controlar los volúmenes extraídos y la recarga subterránea, evaluar la competencia entre usos y proteger los caudales ecológicos. La dimensión cualitativa comprende efluentes, lixiviados, elementos tóxicos, drenaje ácido de mina, residuos mineros y medidas de rehabilitación. Ambas dimensiones se relacionan, ya que la contaminación reduce el volumen confiable disponible para consumo humano, agricultura, ganadería y conservación ambiental (Gilsbach et al., 2022; Macklin et al., 2023).

La gobernanza también debe incorporar perspectivas territoriales y acumulativas. Una mina puede cumplir sus volúmenes autorizados o parámetros de descarga y, aun así, contribuir al deterioro de un acuífero o una cuenca sometidos a múltiples presiones. Las evaluaciones aisladas por proyecto pueden omitir los efectos conjuntos de extracciones, descargas, residuos y cambios de uso o cobertura del suelo (Macklin et al., 2023).

La responsabilidad empresarial comprende las obligaciones, decisiones y prácticas mediante las cuales una organización identifica, previene, controla y remedia los impactos sociales y ambientales de sus operaciones. En minería debe incorporarse a la planeación, el diseño, los presupuestos, la operación, la contratación, la gestión de incidentes y el cierre. No debe relegarse a programas filantrópicos o inversiones comunitarias desconectadas de los impactos reales del negocio (Isacowitz et al., 2022; Owen y Kemp, 2023).

La literatura reciente destaca la brecha entre las declaraciones empresariales y su aplicación efectiva. Algunas empresas publican políticas de sostenibilidad, códigos de conducta y compromisos generales sin metas,

presupuestos, responsables internos ni verificación. En esas condiciones, la responsabilidad social puede convertirse en una herramienta reputacional en lugar de integrarse en la gestión operativa y financiera (Isacowitz et al., 2022).

El primer nivel de responsabilidad es el cumplimiento normativo. Comprende títulos de concesión, autorizaciones ambientales, permisos, medidores, infraestructura de control y medidas para prevenir derrames o descargas no autorizadas. La reforma publicada en mayo de 2023 modificó disposiciones de la legislación minera relacionadas con concesiones de agua, protección ambiental, residuos, factibilidad de los proyectos y planeación del cierre (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2023).

El cumplimiento legal no agota la responsabilidad empresarial. Las normas establecen requisitos generales y mínimos, pero el riesgo depende de las condiciones específicas del sitio, la tecnología, la toxicidad de las sustancias, el clima, la vulnerabilidad de los acuíferos y la proximidad de las comunidades. Una empresa prudente debe adoptar precauciones adicionales cuando exista evidencia de un riesgo grave, aunque una conducta no se encuentre expresamente prohibida (Owen y Kemp, 2023).

La prevención exige identificar y mitigar los riesgos antes de que se materialicen. Incluye establecer líneas base, modelar flujos superficiales y subterráneos, analizar escenarios de sequía y precipitación extrema, diseñar sistemas de contención, inspeccionar las instalaciones y preparar planes de respuesta. En las zonas áridas, la prevención adquiere especial valor porque sustituir una fuente contaminada suele ser difícil y costoso (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Macklin et al., 2023).

El principio de precaución se aplica cuando existe incertidumbre científica, pero se identifica la posibilidad de daños graves o irreversibles. No es necesario esperar certeza absoluta para adoptar medidas protectoras. La incertidumbre debe reforzar los controles frente a soluciones de lixiviación, drenaje ácido, depósitos de relaves y posibles afectaciones a los acuíferos, en lugar de justificar la postergación de decisiones (Macklin et al., 2023).

El principio de “quien contamina paga” establece que los costos de prevención, control, remediación y reparación deben recaer en el responsable del daño. No debe reducirse al pago de una sanción. La reparación puede comprender restauración ambiental, suministro de agua segura, vigilancia

de la salud, compensación por afectaciones productivas, seguimiento epidemiológico y sostenimiento de la infraestructura mientras persistan los efectos (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Semarnat, 2023).

Niveles complementarios de la responsabilidad empresarial

Los niveles de responsabilidad son complementarios. El primero corresponde al cumplimiento obligatorio; el segundo, a la prevención y gestión más allá de los requisitos mínimos; el tercero, a la remediación proporcional al daño; y el cuarto, a la sostenibilidad hídrica territorial. No son intercambiables: una inversión voluntaria en la comunidad no subsana un incumplimiento ni elimina la obligación de remediar un entorno afectado por las operaciones (Isacowitz et al., 2022; Owen y Kemp, 2023).

La justicia ambiental permite examinar la distribución de beneficios, cargas y poder de decisión. La minería puede generar empleo, inversión e ingresos fiscales, pero la contaminación, la pérdida de fuentes de agua y los riesgos para la salud pueden concentrarse en comunidades rurales con menor poder político y económico. La justicia distributiva pregunta quién se beneficia y quién asume los costos; la procedimental, quién participa en las decisiones; y la de reconocimiento, si se respetan las identidades, conocimientos y formas de vida de las comunidades (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Owen y Kemp, 2023).

La participación social pierde sentido cuando las decisiones ya han sido adoptadas. Debe comenzar con información oportuna y comprensible, plazos razonables, acceso a asistencia técnica y posibilidades reales de incidir en los proyectos. Además, debe respetar los derechos colectivos y los procedimientos de consulta aplicables cuando las operaciones puedan afectar a comunidades indígenas (Jackson et al., 2023).

La licencia social para operar se refiere al grado de aceptación que una empresa obtiene de las comunidades. El concepto resulta problemático cuando se interpreta como una aprobación indirecta conseguida mediante beneficios, comunicación o inversión social. La aceptación comunitaria no sustituye los derechos, las autorizaciones legales, la participación ni la

reparación. Un enfoque centrado exclusivamente en la continuidad del negocio puede transformar la responsabilidad social en una estrategia de gestión reputacional (Owen y Kemp, 2023).

La gestión responsable del agua exige que las empresas reconozcan su dependencia de fuentes comunes y contribuyan a conservarlas. El enfoque integra eficiencia interna, consideración del contexto territorial, colaboración con otros usuarios y transparencia para la protección de las cuencas. Su principal aportación es superar una gestión limitada al perímetro de las operaciones mineras (Gilsbach et al., 2022; Robertson et al., 2024).

Las empresas, sin embargo, no deben convertirse de facto en autoridades de gobernanza hídrica. Pueden contribuir a fortalecer las instituciones, pero no sustituir las funciones estatales de asignación, regulación, supervisión, cumplimiento y protección de derechos. La participación empresarial debe fortalecer, y no condicionar ni desplazar, a las instituciones públicas (Robertson et al., 2024).

La transparencia es otro componente esencial. Los informes corporativos suelen presentar datos agregados sobre extracción, consumo, recirculación y descarga, pero esta información puede resultar insuficiente para evaluar el impacto de una unidad minera sobre una fuente específica. Gilsbach et al. (2022) identifican diferencias entre la información divulgada por las empresas y aquella que necesitan las comunidades, los gobiernos, los inversionistas y otros actores sociales.

La transparencia sustantiva debe identificar las fuentes de suministro, los volúmenes concesionados y extraídos, la recirculación, el consumo consuntivo, las descargas, la calidad del recurso y de los efluentes, los incidentes y las medidas de cierre. La información debe presentarse por unidad minera, mediante métodos consistentes y suficientemente claros para evitar interpretaciones erróneas (Gilsbach et al., 2022).

La capacidad estatal es necesaria para convertir los compromisos en resultados. La responsabilidad voluntaria no sustituye la inspección, las sanciones, las garantías de cumplimiento ni la protección de los usuarios. Los gobiernos pueden orientar el comportamiento empresarial mediante regulación, incentivos, información y espacios participativos, pero deben proteger el interés colectivo y corregir las asimetrías de poder entre empresas y comunidades (Jackson et al., 2023).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación cualitativa, teórica y documental. El diseño permitió integrar bibliografía sobre gobernanza hídrica, responsabilidad empresarial, justicia ambiental, gestión responsable del recurso, transparencia minera, prevención y remediación de daños.

La revisión comprendió publicaciones científicas, legislación, estadísticas oficiales de producción minera y disponibilidad de acuíferos, evaluaciones ambientales y documentos relacionados con el derrame del río Sonora. Se incluyeron antecedentes cuando fueron necesarios para explicar la evolución del problema, pero se priorizaron publicaciones de 2021 a 2024.

La búsqueda documental combinó términos en español e inglés relacionados con minería, agua, responsabilidad social empresarial, gobernanza hídrica, justicia ambiental, transparencia, jales, remediación, cierre de minas, río Sonora y gestión responsable del agua.

Los documentos se seleccionaron por su procedencia académica u oficial, pertinencia para la pregunta de investigación, claridad metodológica y utilidad para construir categorías conceptuales. Se excluyeron opiniones sin evidencia verificable y materiales sobre minería que no abordaban su relación con el agua.

El análisis se organizó en seis categorías: disponibilidad y competencia por el agua; eficiencia y recirculación; prevención de la contaminación; transparencia y rendición de cuentas; participación y justicia ambiental; y reparación, cierre y seguimiento. Posteriormente, estas categorías se relacionaron con las funciones de empresas, autoridades, comunidades e instituciones científicas.

Los hallazgos constituyen una síntesis teórica acotada al caso de Sonora. No pretenden medir el consumo de cada empresa ni establecer responsabilidades jurídicas individuales. La falta de información pública homogénea sobre entradas, recirculación, descargas y consumo limita la comparación entre unidades mineras y, al mismo tiempo, representa uno de los principales problemas de gobernanza identificados.

Resultados

El primer hallazgo es que el riesgo hídrico de la minería debe evaluarse territorialmente. No basta con conocer si una empresa posee una concesión o se mantiene dentro del volumen autorizado. También deben considerarse la disponibilidad del acuífero, las tendencias de abatimiento, la demanda de otros usuarios, la calidad del recurso, las sequías y sus efectos acumulativos (Conagua, 2023; Gilsbach et al., 2022).

Los balances negativos de varios acuíferos de Sonora indican que la autorización de nuevos proyectos o ampliaciones no debe sustentarse únicamente en la viabilidad económica o geológica del yacimiento. Extraer por encima de la disponibilidad de un acuífero deficitario transfiere riesgos a otros usuarios y agrava el deterioro de la fuente. La evaluación debe determinar cuánto recurso estará disponible, qué cambios de uso podrían ocurrir y qué medidas impedirán rebasar los límites territoriales (Conagua, 2023).

Una línea base independiente constituye un elemento central de la responsabilidad empresarial. Antes de iniciar o ampliar una operación deben documentarse los niveles y caudales, la calidad química, las fuentes de las comunidades, los ecosistemas dependientes y las variaciones estacionales. La línea base debe ser reproducible y conservarse para comparar los cambios durante la operación, el cierre y la posclausura (Gilsbach et al., 2022; Robertson et al., 2024).

Las investigaciones financiadas por la industria deben poder ser consultadas y cuestionadas públicamente. La autoridad debe validar los métodos, permitir el acceso a los datos primarios y promover evaluaciones adicionales. Las universidades y los centros públicos de investigación pueden reducir las asimetrías de información, siempre que se divulguen las fuentes de financiamiento y se preserve la autonomía científica (Jackson et al., 2023).

El segundo resultado es que la eficiencia hídrica debe evaluarse de manera permanente. Se requieren métricas a lo largo de los procesos que permitan identificar pérdidas y relacionar el consumo con la producción. El volumen total puede disminuir por una reducción temporal de la actividad, por lo que debe complementarse con indicadores como los metros cúbicos de agua por tonelada extraída o procesada (Gilsbach et al., 2022).

La eficiencia puede mejorarse mediante mantenimiento, detección de fugas, separación de corrientes, espesamiento de relaves, recuperación de agua de proceso y optimización de enjuagues y limpiezas. Cuando sea técnicamente viable, el uso de agua tratada o salobre en lugar de fuentes de mayor calidad puede reducir la presión sobre el abastecimiento, aunque requiere controles frente a corrosión, incrustaciones y otros efectos sobre los procesos (Robertson et al., 2024).

La recirculación es una estrategia relevante, pero debe evaluarse con precisión. Una tasa elevada no demuestra por sí misma un menor consumo cuando el circuito moviliza grandes volúmenes o registra pérdidas por evaporación, infiltración y almacenamiento en relaves. Los informes deben distinguir extracción, recirculación, consumo consuntivo, descarga y agua no recuperada (Gilsbach et al., 2022).

La reutilización interna tampoco elimina los riesgos de calidad. La acumulación de sales, metales y reactivos puede limitar los ciclos y exigir purgas o tratamientos adicionales. Las empresas deben demostrar que la recirculación reduce efectivamente las extracciones sin trasladar contaminantes hacia suelos, instalaciones de almacenamiento o cuerpos receptores (Robertson et al., 2024).

El tercer hallazgo es la necesidad de fortalecer la prevención. Las tuberías, áreas de lixiviación, instalaciones de relaves, canales, pozos de monitoreo, sistemas de contención y procedimientos de respuesta requieren inspección y mantenimiento. La evaluación debe abarcar la operación normal y escenarios de precipitación extrema, cortes de energía, movimientos geotécnicos, errores humanos y fallas simultáneas de varios controles (Macklin et al., 2023).

El derrame del río Sonora recuerda que las consecuencias de estas fallas pueden prolongarse durante años. El diagnóstico federal concluido en 2023 identificó impactos persistentes y cuestionó la suficiencia de la remediación inicial. Este antecedente sustenta la necesidad de redundancia, inspecciones independientes, sistemas de alerta y garantías financieras obligatorias para atender emergencias y efectos de largo plazo (Semarnat, 2023).

Los residuos mineros deben incorporarse a la evaluación de riesgos acumulativos. Después del cese de la producción, las instalaciones de relaves y las áreas de lixiviación permanecen y pueden requerir monitoreo durante

periodos prolongados. La movilización histórica de residuos puede generar contaminación crónica y afectar sistemas fluviales y poblaciones a gran escala espacial (Macklin et al., 2023).

El cuarto hallazgo es que la transparencia debe pasar de la información corporativa agregada a la divulgación por unidad minera. Deben publicarse las fuentes de suministro, los volúmenes, la calidad, los incidentes, las metas y el desempeño de cada sitio. Los datos requieren periodicidad, metodologías uniformes y formatos comparables y comprensibles para autoridades, especialistas y comunidades (Gilsbach et al., 2022).

La rendición de cuentas debe distinguir el volumen concesionado del efectivamente extraído. También debe identificar el origen del agua, el porcentaje recirculado, el consumo consuntivo, las descargas y el agua retenida en instalaciones de residuos. Sin estas distinciones no puede evaluarse con precisión la presión real de la actividad (Gilsbach et al., 2022; Robertson et al., 2024).

La transparencia exige reconocer los incidentes, las incertidumbres y los resultados desfavorables. Los informes que presentan únicamente logros o porcentajes de cumplimiento debilitan la confianza. Deben comunicarse oportunamente los derrames, excedencias, fallas, causas de las desviaciones y medidas correctivas (Gilsbach et al., 2022).

Los datos empresariales deben contrastarse mediante monitoreo público e independiente. Las empresas pueden contar con instrumentos y laboratorios propios, pero la verificación no debe depender exclusivamente del actor supervisado. Un sistema equilibrado integraría vigilancia gubernamental, laboratorios acreditados, revisión científica y observación comunitaria (Jackson et al., 2023).

El quinto hallazgo es la necesidad de participación social. Las comunidades organizadas pueden contribuir a identificar fuentes, puntos de monitoreo, riesgos y prioridades de remediación. Su experiencia local permite detectar cambios en caudal, color, sabor, vegetación, salud animal o productividad agrícola que los sistemas institucionales no siempre registran oportunamente (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021).

El conocimiento comunitario respalda el análisis técnico, orientando las preguntas sobre qué es lo más importante y facilitando las decisiones sobre si las medidas consideradas son pertinentes. La combinación del co-

nocimiento científico y la experiencia territorial mediante procedimientos transparentes y significativos fortalece la gobernanza (Jackson et al., 2023).

Los mecanismos de denuncia deben ser independientes, accesibles y contar con plazos de respuesta. Los procedimientos administrados únicamente por las empresas pueden generar desconfianza. El sistema debe articular el registro, la investigación y la resolución de las quejas con la posibilidad de acudir a autoridades administrativas o judiciales (Isacowitz et al., 2022).

El apoyo social patrocinado por la empresa no debería estar condicionado a la participación, ni restringir la libertad para impugnar cualquier proyecto. Los beneficios pueden derivarse de obras, becas y programas comunitarios, pero nunca pueden sustituir el cumplimiento de los derechos de las poblaciones afectadas, ni la reparación o el reconocimiento de dichos derechos (Owen y Kemp, 2023).

El sexto hallazgo se refiere a la reparación integral. La respuesta debe abarcar la recuperación ambiental, el suministro de agua potable segura, la atención a la salud, las actividades productivas afectadas y las pérdidas económicas. La reparación no debe limitarse a pagos únicos, porque algunos efectos aparecen o persisten durante periodos prolongados (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Semarnat, 2023).

El análisis del Fideicomiso Río Sonora muestra que construir infraestructura sin asegurar su operación resulta insuficiente. Las plantas de tratamiento, pozos, estaciones de monitoreo y servicios de saneamiento requieren personal, energía, mantenimiento y presupuesto. La reparación debe sostenerse durante el tiempo necesario y no concluir prematuramente (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021).

Los fondos de reparación deben evaluarse con base en escenarios técnicos y conservar la posibilidad de ampliación a medida que surjan nuevos hechos. Su administración debe incluir representación social, auditorías sobre su utilización y la divulgación de sus gastos, así como criterios transparentes para identificar a los beneficiarios y medidas para la restauración (Haro Velarde y Salazar Adams, 2021; Semarnat, 2023).

Mientras los efectos puedan vincularse con el daño, la obligación de reparar debe continuar. Esta responsabilidad no desaparece porque se extinga un fideicomiso, cambie una administración o concluyan formalmente determinadas obras. Los instrumentos financieros deben impedir que los

costos futuros se transfieran al presupuesto público o a las comunidades afectadas (Owen y Kemp, 2023).

El séptimo hallazgo corresponde al cierre y la posclausura. Cada operación debe contar en todo momento con un plan actualizado y garantías financieras suficientes. El plan debe contemplar estabilización de relaves, gestión y tratamiento del agua, restauración, monitoreo de largo plazo y usos posteriores del sitio (DOF, 2023).

La garantía financiera debe actualizarse con el tiempo conforme evolucionen los costos, la infraestructura y los riesgos. Una cotización proporcionada al inicio de la operación puede no ser suficiente décadas después. Owen y Kemp (2023) sostienen que los recursos deben protegerse legalmente frente a la insolvencia, las ventas de activos o la reestructuración corporativa.

El comportamiento de la instalación, más que un cronograma uniforme, debe guiar el monitoreo posterior al cierre. Los riesgos derivados de los relaves, los drenajes y los contaminantes pueden persistir durante muchos años. Las garantías deben liberarse con base en evidencia independiente sobre la estabilidad física, la estabilidad química y la calidad del agua (MacKlin et al., 2023).

A partir de los resultados se propone un modelo integrado de gobernanza del agua en la minería compuesto por cuatro grupos de actores: (i) autoridades públicas; (ii) empresas mineras; (iii) comunidades; y (iv) instituciones científicas. El modelo se estructura en ocho componentes: planeación territorial, prevención, eficiencia, transparencia, monitoreo independiente, participación, reparación y cierre.

Las autoridades deben conservar la decisión final sobre concesiones, permisos, prioridades de uso, inspecciones, sanciones y protección de derechos. También deben integrar la información de las instituciones responsables del agua, la minería, el ambiente, la salud y la protección civil. La fragmentación institucional permite evaluar por separado componentes de una operación y perder de vista sus efectos sistémicos (Jackson et al., 2023).

Las empresas deben cumplir la legislación, prevenir daños, divulgar información oportunamente y reparar los impactos atribuibles a sus operaciones. Su participación en proyectos territoriales puede movilizar recursos y tecnología, pero no debe otorgarles control sobre la asignación del

agua ni sobre los organismos encargados de supervisarlas (Robertson et al., 2024).

Desde la planificación hasta el cierre y el período posterior al cierre, las comunidades también deben tener acceso a información comprensible, asistencia técnica y vías para participar. Por ejemplo, podrían crearse fondos independientes para financiar servicios de asesoría científica y legal sin seleccionar unilateralmente a los especialistas de la empresa (Jackson et al., 2023).

Las universidades y los centros de investigación pueden apoyar los estudios de línea base, el monitoreo, la evaluación tecnológica y el análisis de riesgos. Su participación requiere transparencia sobre el financiamiento, divulgación de conflictos de interés, acceso a datos y procedimientos de revisión científica (Jackson et al., 2023).

El modelo debe aplicarse a escala de cuenca y acuífero. Las decisiones sobre nuevas concesiones o ampliaciones deben considerar las extracciones acumuladas y la disponibilidad efectiva. En zonas deficitarias, la autorización debe condicionarse a reducciones demostrables, sustitución de fuentes, tratamiento, recirculación o recuperación de agua (Conagua, 2023).

Las compensaciones no deben limitarse a la compra de derechos sin evaluar las consecuencias sociales. Transferir una concesión agrícola puede reducir la extracción formal, pero afectar el empleo, la producción y las comunidades. La medida debe demostrar un beneficio territorial neto y evitar que la carga recaiga en actores con menor capacidad económica.

La colaboración público-privada puede apoyar redes de agua tratada, monitoreo, infraestructura de emergencia y rehabilitación ambiental. Estos proyectos deben perseguir objetivos públicos, contar con reglas transparentes, indicadores medibles y una distribución de costos acorde con las responsabilidades y beneficios de cada participante (Robertson et al., 2024).

Los indicadores de gobernanza deben incluir extracción efectiva, intensidad de consumo, porcentaje de recirculación, cantidad y tipo de descargas, número y gravedad de incidentes, cumplimiento de las medidas correctivas, cobertura del monitoreo independiente, tiempo de respuesta a quejas, grado de reparación y suficiencia de las garantías de cierre (Gilsbach et al., 2022).

Los indicadores deben interpretarse como tendencias y relacionarse con la salud de la fuente. Si una empresa mejora su intensidad hídrica, pero aumenta la extracción total debido a una expansión productiva, el desempeño corporativo debe evaluarse junto con la evolución del acuífero y de la cuenca y con las condiciones de los demás usuarios (Gilsbach et al., 2022).

El modelo distingue la responsabilidad individual de la colaboración. Cada empresa debe prevenir y remediar los impactos directamente relacionados con sus operaciones. La colaboración comienza cuando participa con otros actores para atender problemas compartidos que exceden su ámbito individual. Esta distinción evita que las alianzas sustituyan los compromisos propios.

La transparencia también debe distinguirse de la publicidad. La publicidad comunica resultados seleccionados por la organización; la transparencia permite conocer datos, metodologías, riesgos, incidentes y medidas correctivas. La confianza requiere que terceros puedan evaluar el desempeño incluso cuando los resultados sean desfavorables para la empresa (Gilsbach et al., 2022).

Por último, el modelo diferencia la continuidad operativa de la seguridad hídrica territorial. Garantizar el abastecimiento de una mina no demuestra que sus operaciones sean compatibles con la cuenca. La seguridad hídrica exige que la producción se ajuste a las necesidades humanas, productivas y ambientales del territorio (Robertson et al., 2024).

Conclusiones

La minería es una actividad económica estratégica para Sonora y para las cadenas nacionales e internacionales de suministro de cobre y otros minerales. Esta relevancia no elimina sus responsabilidades ambientales. La escala de las operaciones, la duración de los proyectos y su ubicación en territorios áridos exigen estándares estrictos de prevención, supervisión y rendición de cuentas.

La presión sobre diversos acuíferos demuestra que la gestión minera del agua no puede evaluarse únicamente dentro de cada instalación. Se requiere analizar a escala territorial las concesiones, extracciones, recirculaciones,

descargas, competencia entre usos, sequías, ecosistemas e impactos acumulativos.

El caso del río Sonora evidencia que los efectos de una falla pueden prolongarse durante años. Los planes de contingencia son insuficientes sin financiamiento sostenible, mantenimiento, vigilancia ambiental, atención a la salud y participación comunitaria. Las compensaciones de corto plazo no sustituyen la restauración integral.

La responsabilidad empresarial comienza con el cumplimiento, pero comprende también prevención, precaución, eficiencia, transparencia, participación, remediación y cierre. Los programas voluntarios o comunitarios no compensan el incumplimiento ni las obligaciones derivadas de un daño ambiental.

La gestión responsable exige que las empresas reconozcan su dependencia de fuentes compartidas y contribuyan a conservarlas. Sin embargo, la participación privada debe permanecer bajo supervisión pública. Las empresas pueden apoyar la gobernanza, pero no asumir las funciones de asignar recursos, establecer prioridades, supervisarse a sí mismas o decidir unilateralmente que una reparación ha sido suficiente.

La transparencia debe aplicarse a cada unidad minera e incluir las fuentes de abastecimiento, los volúmenes, la calidad del agua de entrada y salida, la recirculación, el consumo, las descargas, los incidentes, las alteraciones del uso del suelo y los indicadores de cierre. Los informes corporativos agregados no permiten relacionar una operación específica con el acuífero y las comunidades que dependen de él.

La participación comunitaria debe comenzar antes de la autorización y mantenerse durante la operación, la remediación, el cierre y la posclausura. Se requieren datos comprensibles, asistencia técnica independiente, mecanismos para incorporar observaciones y vías de rendición de cuentas externas a las empresas.

El modelo propuesto se sustenta en rectoría pública, responsabilidad empresarial, participación comunitaria y apoyo científico independiente. Sus componentes son planeación territorial, prevención, eficiencia, transparencia, monitoreo, participación, reparación y cierre.

La legitimidad futura de la minería en Sonora dependerá de su compatibilidad con la seguridad hídrica. Esto exige transitar del cumplimiento

formal hacia una gobernanza territorial preventiva, basada en evidencia, rendición de cuentas y equidad.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua. (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos del estado de Sonora. Gobierno de México.
- Diario Oficial de la Federación. (2023, 8 de mayo). Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Minera, de la Ley de Aguas Nacionales, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en materia de concesiones para minería y agua. Diario Oficial de la Federación.
- Gilsbach, L., Schütte, P., y Franken, G. (2022). Water reporting in mining: Are corporates losing sight of stakeholder interests? *Journal of Cleaner Production*, 345, 131016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131016>
- Haro Velarde, N., y Salazar Adams, A. (2021). Agua, contaminación y su manejo en la región norte de México: El caso del río Sonora. *Frontera Norte*, 33, e2136. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2136>
- Isacowitz, J. J., Schmeidl, S., y Tabelin, C. B. (2022). The operationalisation of corporate social responsibility in a mining context. *Resources Policy*, 79, 103012. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103012>
- Jackson, S., Poelzer, G., Poelzer, G., y Noble, B. (2023). Mining and sustainability in the Circumpolar North: The role of government in advancing corporate social responsibility. *Environmental Management*, 72, 37-52. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01680-1>
- Macklin, M. G., Thomas, C. J., Mudbhakal, A., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Lewin, J., Scussolini, P., Eilander, D., Lechner, A., Owen, J., Bird, G., Kemp, D., y Mangalaa, K. R. (2023). Impacts of metal mining on river systems: A global assessment. *Science*, 381(6664), 1345-1350. <https://doi.org/10.1126/science.adg6704>
- Owen, J. R., y Kemp, D. (2023). A return to responsibility: A critique of the single actor strategic model of corporate social responsibility. *Journal of Environmental Management*, 341, 118024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118024>
- Robertson, J., Côté, C., y Stevens, S. (2024). Examining reported company commitments to water stewardship: Working beyond the mine? *Resources Policy*, 96, 105193. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105193>
- Secretaría de Economía y Turismo del Estado de Sonora. (2024). Minería: Sonora productora líder. Gobierno del Estado de Sonora.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Dictamen diagnóstico ambiental del río Sonora. Gobierno de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). Acciones para atender las afectaciones ambientales y sociales en la cuenca del río Sonora. Gobierno de México.

4. Chihuahua: eficiencia hídrica y colaboración público-privada en el sector agroindustrial*



DULCE MARÍA MONROY BECERRIL**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.04>

Resumen

Chihuahua posee una importante actividad agrícola, ganadera y agroindustrial, pero gran parte de ella se desarrolla en un territorio árido y semiárido, expuesto a sequías recurrentes, reducción de almacenamientos y sobreexplotación de acuíferos. El objetivo de este capítulo es identificar, mediante una investigación teórica y documental, las condiciones tecnológicas, económicas e institucionales necesarias para mejorar la eficiencia hídrica del sector agroindustrial mediante esquemas de colaboración público-privada. La revisión integra aportes sobre productividad del agua, modernización del riego, gobernanza policéntrica, reúso de aguas residuales y financiamiento colaborativo. Los resultados muestran que la tecnificación no garantiza ahorros territoriales, pues los volúmenes recuperados pueden destinarse a ampliar superficies o sembrar cultivos con mayor demanda. Se propone un modelo que articula medición, programación del riego, mantenimiento, infraestructura colectiva, reconversión productiva, reúso seguro, asistencia técnica y financiamiento condicionado a resultados verificables. Se concluye que la colaboración entre autoridades, usuarios, empresas agroindustriales y organizaciones de productores puede fortalecer la resiliencia del sector

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577> ; Scopus ID: 572 24399366 ; correo electrónico: dmonroyb@ipn.mx

cuando mantiene la rectoría pública, distribuye equitativamente los beneficios y exige reducciones netas de extracción.

Palabras clave: *eficiencia hídrica, agroindustria, tecnificación del riego, colaboración público-privada.*

Introducción

Chihuahua cuenta con un sistema productivo estrechamente vinculado con la agricultura de riego, la ganadería y la transformación agroindustrial. En distintas regiones se desarrollan cadenas de valor asociadas con alfalfa, chile, nuez pecanera, cacahuete, manzana, hortalizas, leche y carne, que requieren agua tanto en la producción primaria como en limpieza, enfriamiento, transformación, almacenamiento y servicios auxiliares. La relevancia económica y social de estas actividades contrasta con la aridez, las elevadas tasas de evaporación y la variabilidad de las precipitaciones que caracterizan gran parte del estado (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2026; Villalobos-Cano et al., 2024).

La producción agroindustrial depende de fuentes superficiales y subterráneas. Las presas, canales y redes de distribución abastecen a los distritos de riego, mientras que numerosas unidades productivas dependen de pozos. Esta configuración genera vulnerabilidades diferenciadas: las zonas abastecidas por presas enfrentan reducciones de almacenamiento durante periodos secos prolongados, y las regiones dependientes de acuíferos registran abatimiento, mayores costos de bombeo y posible deterioro de la calidad del agua (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024; Mendieta-Mendoza et al., 2021).

Diversos acuíferos de Chihuahua, entre ellos Ascensión, Baja Babícora, Buenaventura, Cuauhtémoc, Casas Grandes, El Sauz-Encinillas, Janos, Laguna de Mexicanos y Samalayuca, presentan disponibilidad media anual negativa. Esta condición indica que no existe volumen adicional disponible sin afectar la descarga natural comprometida, los usos existentes o el balance hidrológico de la fuente, lo que limita la posibilidad de responder al crecimiento productivo mediante nuevas extracciones (Conagua, 2024).

La sequía representa otra presión estructural. La estrategia estatal de atención reconoció que numerosos municipios enfrentaban distintos grados de sequía y contempló créditos, subsidios, tecnificación, reconversión de cultivos y coordinación entre autoridades y productores. La recurrencia de estos episodios muestra la vulnerabilidad de la agricultura ante periodos prolongados de precipitación reducida, mayor demanda y menor disponibilidad en los almacenamientos (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2024).

La recurrencia de estos fenómenos hace necesario fortalecer los sistemas de alerta temprana. Melchor Varela y Ramírez Hernández (2024) encontraron que los modelos de aprendizaje automático pueden apoyar la predicción del Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado en Chihuahua. Su utilidad práctica depende de traducir la información climática en decisiones sobre superficie sembrada, fechas de siembra, volúmenes de riego, selección de cultivos y mecanismos de aseguramiento.

El cambio climático puede intensificar estas presiones al modificar el régimen de precipitación, incrementar la evapotranspiración y aumentar la frecuencia o magnitud de los eventos extremos. Los impactos no serán iguales en todas las regiones, productores y cultivos, pero las actividades de temporal y los sistemas de riego dependientes de fuentes sobreexplotadas son particularmente vulnerables. La adaptación requiere combinar infraestructura, información, innovación agronómica, financiamiento y cambio institucional (Estrada et al., 2022; Mendieta-Mendoza et al., 2021).

El Distrito de Riego 005 Delicias constituye un referente para analizar esta problemática. Se localiza en el centro-sur del estado y comprende más de 100 mil hectáreas, de las cuales aproximadamente 75 mil se encuentran bajo riego. Los usuarios se organizan en módulos responsables de distribuir el agua y mantener parte de la infraestructura. La región produce alfalfa, chile, cacahuete, cebolla y nuez pecanera, y depende principalmente de las presas La Boquilla y Francisco I. Madero, además de fuentes subterráneas complementarias (Villalobos-Cano et al., 2024).

La relevancia económica del distrito no elimina las tensiones por el agua. Los cultivos perennes pueden generar ingresos elevados y sostener cadenas agroindustriales consolidadas, pero reducen la flexibilidad para ajustar la superficie durante los años secos. A diferencia de un cultivo anual, que puede dejar de sembrarse cuando disminuye la disponibilidad, los huertos

de nogal requieren riego para conservar árboles establecidos durante varios años. Estas diferencias deben incorporarse a la planeación y a la evaluación de la vulnerabilidad productiva (Villalobos-Cano et al., 2024).

En este contexto, la eficiencia hídrica se ha convertido en un objetivo de la política agrícola. Las medidas incluyen revestimiento o entubamiento de canales, nivelación del terreno, rehabilitación de pozos, automatización de compuertas, riego por goteo, aspersión o microaspersión y sensores de humedad para programar el riego según la evapotranspiración. Su efectividad depende de la operación, el mantenimiento, el tipo de cultivo y la escala en la que se miden los resultados (Chávez et al., 2022; Villalobos-Cano et al., 2024).

El financiamiento es uno de los principales obstáculos para modernizar la infraestructura. Los sistemas presurizados requieren equipos, tuberías, válvulas, filtros, energía, automatización y mantenimiento. Los pequeños productores suelen enfrentar restricciones de capital, garantías y capacidad técnica, mientras que las inversiones en canales principales, plantas de bombeo o redes de distribución superan la capacidad de una unidad individual.

Esta limitación ha fortalecido los esquemas de colaboración entre gobierno y usuarios. En un programa estatal de uso sustentable, Conagua cubrió 50 % del costo y el gobierno de Chihuahua y los productores aportaron 25 % cada uno. Bajo este modelo se rehabilitaron y tecnificaron obras durante 2024, con continuidad técnica durante 2025 (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025a).

En abril de 2025, autoridades federales y estatales y representantes de los productores acordaron modernizar los distritos de riego 005 Delicias y 009 Valle de Juárez. El esquema consideró una inversión conjunta superior a 2 300 millones de pesos y buscó elevar la productividad agrícola y recuperar volúmenes para consumo humano. Este precedente muestra la magnitud financiera y organizativa requerida, pero también obliga a definir cómo se medirán los ahorros, quién recibirá los beneficios y cuál será el destino de los caudales recuperados (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025b).

En este capítulo, la colaboración público-privada se interpreta en un sentido amplio. Comprende no solo contratos de largo plazo para construir y operar infraestructura, sino también coinversión, aportaciones tripartitas, contratos tecnológicos, financiamiento a proveedores, participación de

módulos de riego, infraestructura compartida y acuerdos entre empresas agroindustriales y productores.

El objetivo es analizar los criterios de eficiencia hídrica y colaboración público-privada necesarios para fortalecer la sostenibilidad del sector agroindustrial de Chihuahua. La pregunta guía es la siguiente: ¿cómo diseñar instrumentos de tecnificación, financiamiento y coordinación que produzcan ahorros reales, sostengan la viabilidad productiva y eviten que la modernización incremente la presión total sobre las fuentes?

La premisa es que la eficiencia de una unidad productiva no equivale automáticamente a sostenibilidad territorial. Una tecnología puede reducir el volumen aplicado por hectárea y, al mismo tiempo, incentivar la ampliación de la superficie, dobles ciclos o cultivos de mayor demanda. Por ello, el apoyo debe vincularse con medición, límites de extracción y resultados territoriales verificables.

Aproximación teórica y conceptual

La eficiencia hídrica consiste en obtener mayores beneficios con el agua utilizada. Ningún indicador resulta suficiente para todas las escalas agrícolas. Es necesario distinguir la eficiencia de conducción, distribución y aplicación, así como la productividad física, la productividad económica y la eficiencia territorial.

La eficiencia de conducción expresa la proporción del agua derivada desde una fuente que llega a los puntos de entrega. Puede reducirse por infiltración, evaporación, vegetación en los canales, fugas y deficiencias operativas. El revestimiento, el entubamiento, el mantenimiento y la automatización mejoran el control, pero también deben evaluarse los retornos hacia los acuíferos y otros usos asociados con la infiltración (Chávez et al., 2022; Ojeda Bustamante et al., 2024).

La eficiencia de distribución se relaciona con entregar a cada usuario el volumen autorizado en el momento requerido. Una entrega tardía puede disminuir la productividad aun cuando las pérdidas físicas sean moderadas. La programación, la medición y la comunicación entre módulos resultan tan importantes como la infraestructura.

La eficiencia de aplicación es la proporción del agua suministrada a la parcela que permanece disponible en la zona radicular. Las pérdidas pueden producirse por escorrentía, evaporación, percolación profunda o distribución desigual. Los sistemas presurizados suelen brindar mayor control, pero el riego superficial también puede alcanzar eficiencias elevadas cuando se nivelan los terrenos, se ajustan caudales y longitudes de surco y se programa el riego según la demanda del cultivo (Chávez et al., 2022).

La productividad física del agua relaciona el rendimiento con el volumen consumido o aplicado y puede expresarse en kilogramos o toneladas por metro cúbico. Es útil para comparar prácticas dentro de un mismo cultivo, pero puede conducir a interpretaciones erróneas cuando se comparan productos con características económicas, agronómicas y nutricionales distintas.

La productividad económica relaciona el valor monetario de la producción con el volumen de agua. Un cultivo de alto valor puede resultar económicamente más productivo aun cuando demande más agua. Este indicador es pertinente para la agroindustria, pero no debe utilizarse de manera aislada, pues podría favorecer actividades rentables que desplazan cultivos básicos, concentran beneficios o deterioran las fuentes.

La eficiencia territorial considera el balance de la cuenca o del acuífero. Parte del agua que parece perderse en una parcela puede retornar mediante escorrentía o recarga y utilizarse posteriormente, mientras que la evapotranspiración la retira del sistema local. Por ello, las estimaciones parcelarias no pueden extrapolarse directamente al balance territorial (Ojeda Bustamante et al., 2024).

Esta diferencia genera la paradoja de la eficiencia del riego. El volumen aplicado por hectárea puede disminuir, pero el productor puede ampliar la superficie, realizar dobles cosechas o cambiar a cultivos de mayor demanda, con lo cual aumenta el consumo total. Los ahorros deben evaluarse mediante la extracción y el consumo a escala de la fuente, no solo por la eficiencia del equipo instalado (Ojeda Bustamante et al., 2024).

Chihuahua aporta evidencia sobre la necesidad de definir con precisión los indicadores. Villalobos-Cano et al. (2024) estimaron la eficiencia del agua aplicada en el Distrito de Riego 005 para alfalfa, chile, cacahuete y nogal pecanero. Para la alfalfa y el chile encontraron diferencias entre las estimaciones basadas en la evapotranspiración y aquellas sustentadas en funciones

de rendimiento, por lo que concluyeron que los resultados dependen del método utilizado.

Para los nogales pecaneros, los valores superiores al 100 % de la evapotranspiración no necesariamente indicaban una eficiencia de riego excepcional, sino posiblemente una condición de subriego. Esto es importante porque un valor alto del indicador puede ocultar el estrés hídrico, la pérdida de rendimiento en una etapa posterior del desarrollo o ser el resultado del uso de las reservas de humedad almacenadas en el suelo. Los parámetros de interpretación incluyen la producción del cultivo, su fisiología, las precipitaciones y las variaciones temporales (Villalobos-Cano et al., 2024).

La eficiencia debe vincularse con la productividad del agua. En territorios áridos, la política no debe buscar únicamente maximizar la producción por hectárea, sino obtener valor económico, social y alimentario compatible con volúmenes sostenibles. La selección de cultivos debe considerar destinos de mercado, empleo, vínculos agroindustriales y vulnerabilidad ante la sequía.

La reconversión productiva consiste en ajustar cultivos, variedades, calendarios y sistemas de producción a la disponibilidad hídrica y las condiciones climáticas. No significa sustituir indiscriminadamente cultivos, sino valorar inversiones existentes, mercados, infraestructura y conocimientos. En acuíferos deficitarios debe evaluarse si la expansión de especies perennes o intensivas es compatible con la sostenibilidad de largo plazo (Estrada et al., 2022; Villalobos-Cano et al., 2024).

Estas interdependencias pueden entenderse mediante el nexo agua-energía-alimentos y mediante una perspectiva sociohidrológica. La extracción de aguas subterráneas requiere electricidad o combustible; la presurización del riego también demanda energía; y el tratamiento o reúso de agua implica costos adicionales. Por ello, una tecnología que ahorra agua puede incrementar simultáneamente el consumo energético y debe evaluarse dentro del sistema productivo y territorial (Adla et al., 2023).

La profundización de los pozos eleva los costos energéticos y reduce el rendimiento neto de la producción. Los subsidios eléctricos pueden sostener temporalmente la actividad, pero también debilitar el incentivo económico para disminuir la extracción. El apoyo a productores vulnerables debe diseñarse sin estimular una sobreexplotación adicional.

Una alternativa muy prometedora es la programación del riego. Implica decidir cuándo y cuánto regar de acuerdo con factores como la evapotranspiración del cultivo, el estado de la humedad del suelo, la etapa fenológica de la planta, las propiedades del suelo y los pronósticos meteorológicos. Esta tecnología puede consistir en estaciones meteorológicas, sensores, imágenes satelitales, plataformas digitales y modelos predictivos, pero depende del soporte técnico y de datos confiables (Melchor Varela y Ramírez Hernández, 2024; Villalobos-Cano et al., 2024).

Las válvulas automatizadas, los medidores y los sensores pueden mejorar el control, pero no generan eficiencia por sí solos. Deben integrarse en reglas de operación, mantenimiento, capacitación y respuesta. Un medidor que no se consulta, no se calibra o no produce consecuencias ante los excesos tiene una utilidad limitada.

La gobernanza policéntrica permite analizar la coordinación entre autoridades, módulos, asociaciones, empresas, productores y comunidades. Estos sistemas distribuyen funciones entre varios centros de decisión independientes, conectados por reglas, información y mecanismos de resolución de conflictos. La estructura puede adaptarse a la diversidad territorial, siempre que las competencias y responsabilidades permanezcan claras (Valdivia-Cabral et al., 2024).

Los módulos de riego son organizaciones colectivas que median la distribución entre usuarios. Su funcionamiento depende de reglas legítimas, medición precisa, mantenimiento, participación y capacidad de sanción. La evidencia sobre autogestión agrícola en México muestra que las organizaciones locales pueden resolver problemas distributivos, pero requieren transparencia, capacidad técnica y respaldo institucional (Mejía-de la Rosa et al., 2024).

La adopción de prácticas también está influida por redes de información. No todos los productores tienen el mismo acceso a recomendaciones, apoyos e innovaciones. El aprendizaje depende de las relaciones con técnicos, asociaciones, empresas compradoras, proveedores y autoridades. La estructura de propiedad, el tamaño de las unidades y las diferencias sociales condicionan quién recibe información y quién participa en las decisiones (Rivera-Núñez et al., 2023).

La colaboración público-privada comprende acuerdos mediante los cuales actores gubernamentales y no gubernamentales aportan recursos, capacidades o responsabilidades para alcanzar metas comunes. Puede incluir financiamiento, diseño, construcción, provisión tecnológica, capacitación, operación y mantenimiento. Su pertinencia depende de la distribución de riesgos, la transparencia y la existencia de beneficios públicos verificables (Brears, 2023; Ma et al., 2023).

En el contexto agroindustrial, la colaboración no debería limitarse a contratos de infraestructura a gran escala. Las empresas de procesamiento y comercialización pueden financiar tecnologías para los proveedores, brindar asistencia técnica, firmar contratos de compra condicionados a estándares de agua o co-gestionar plantas de tratamiento de aguas residuales. Las instituciones públicas están bien posicionadas para proporcionar subsidios, garantías, información, regulación y supervisión.

Los contratos basados en desempeño pueden incorporarse a las alianzas. La remuneración del proveedor tecnológico puede vincularse parcialmente con resultados como mayor uniformidad, menores pérdidas, menor consumo energético o reducción de volúmenes. Este diseño distribuye el riesgo de desempeño y evita que la inversión pública se limite a comprar equipos que después no operan adecuadamente.

La rectoría pública no debe debilitarse por la participación privada. Corresponde a las autoridades controlar los límites de extracción, supervisar las concesiones, proteger el consumo humano, generar información y evitar que los recursos públicos beneficien únicamente a los actores con mayor capacidad económica. La colaboración complementa, pero no sustituye, a las instituciones.

El reúso de aguas residuales constituye una fuente alternativa. Cuando la calidad es compatible con el uso agrícola y los riesgos se gestionan adecuadamente, el agua tratada puede destinarse a determinados cultivos, forrajes o procesos agroindustriales. El reúso reduce descargas y puede reservar el agua dulce de mayor calidad para usos prioritarios (Christou et al., 2024).

Las aguas residuales pueden contener patógenos, sales, nutrientes, metales, productos farmacéuticos y otros contaminantes emergentes. El riesgo depende del cultivo, el tratamiento, el método de riego, el suelo y la frecuencia de aplicación. Los proyectos requieren estándares, monitoreo y barreras

múltiples para proteger a trabajadores, consumidores, suelos y acuíferos (Christou et al., 2024; Trotta et al., 2024).

La aceptación de productores y compradores también es decisiva. Una alternativa técnicamente viable puede rechazarse por preocupaciones sanitarias o comerciales. La confianza debe sustentarse en evidencia, certificación y monitoreo independiente, no solo en campañas promocionales.

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación cualitativa, teórica y documental de carácter integrador. El diseño permitió relacionar estudios sobre eficiencia de riego, productividad del agua, sequía, vulnerabilidad de acuíferos, gobernanza agrícola, reúso y colaboración público-privada.

La revisión incluyó artículos científicos, información oficial sobre acuíferos, programas de infraestructura hidroagrícola y documentos relativos a los distritos de riego de Chihuahua. Se priorizaron publicaciones de 2021 a 2026 para incorporar literatura reciente y contextos contemporáneos.

Los términos de búsqueda, en español e inglés, se relacionaron con eficiencia hídrica agrícola, productividad del agua, tecnificación del riego, agricultura de Chihuahua, Distrito de Riego 005, sequía, aguas subterráneas, gobernanza, reúso agrícola y colaboración público-privada.

Los criterios de inclusión fueron la pertinencia para la pregunta de investigación, la procedencia académica u oficial, la actualidad y la claridad metodológica. Se excluyeron materiales promocionales sin evidencia técnica, textos sin información verificable y documentos que asumían que instalar tecnología equivale automáticamente a ahorrar agua.

La información se organizó en seis dimensiones: riesgo hídrico territorial; medidas de eficiencia; modernización tecnológica; transformación y cadenas agroindustriales; fuentes alternativas; y colaboración, financiamiento y gobernanza. Después se analizaron sus relaciones para construir un modelo aplicable al contexto de Chihuahua.

Los resultados constituyen una síntesis teórica y no una evaluación de proyectos ejecutados. La información pública permite identificar inversiones, obras y esquemas de aportación, pero rara vez incluye reportes poste-

rios sobre extracción, consumo, productividad, mantenimiento y destino de los volúmenes recuperados. Esta limitación representa uno de los principales hallazgos.

Resultados

El primer resultado es que la eficiencia de un proceso o producto agroindustrial no puede determinarse sin una evaluación integral desde la fuente hasta el producto final. La medición exclusiva en la parcela omite pérdidas en canales, pozos, redes internas, plantas y sistemas de limpieza, además del agua incorporada en insumos como forrajes, energía y servicios.

El diagnóstico debe comenzar con un balance hídrico de la unidad territorial. Este balance debe considerar recarga, almacenamiento, extracción, evapotranspiración, retornos, descargas y transferencias. En distritos abastecidos por presas deben incorporarse las variaciones interanuales y las reglas de asignación; en regiones dependientes de aguas subterráneas deben incluirse los niveles piezométricos y la evolución de los costos de bombeo (Conagua, 2024; Mendieta-Mendoza et al., 2021).

El balance territorial debe complementarse con balances de cada módulo, unidad productiva y planta agroindustrial. Estos permiten determinar si una mejora reduce realmente el consumo o solo desplaza el problema hacia otro eslabón de la cadena.

La medición volumétrica es indispensable. Sin medidores calibrados no es posible asignar responsabilidades, medir eficiencias, detectar fugas ni evaluar los apoyos. Los sistemas deben registrar los volúmenes derivados, entregados, aplicados y extraídos y relacionarlos con superficies, cultivos y producción.

La medición requiere reglas de gobernanza. Los datos deben ser accesibles para usuarios y autoridades, sin exponer información comercial legítimamente confidencial. También se necesitan protocolos de calibración, mantenimiento, auditoría y resolución de discrepancias. Una plataforma controlada exclusivamente por un proveedor o actor regulado puede generar dependencia y desconfianza.

El segundo resultado es que la modernización debe comenzar con la conservación de la infraestructura existente. La limpieza de canales, reparación de compuertas, sellado de juntas, rehabilitación de pozos y sustitución de tuberías pueden producir mejoras antes de incorporar sistemas más complejos. El Programa Especial de Hidráulica e Infraestructura Agrícola de Chihuahua incluyó este tipo de intervenciones en diversos distritos (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025c).

El revestimiento y el entubamiento reducen infiltraciones, pero deben evaluarse hidrogeológicamente. Parte de las aparentes pérdidas puede alimentar acuíferos, vegetación o usuarios aguas abajo. Cada proyecto requiere una línea base y una evaluación territorial para evitar que una mejora local deteriore el balance general (Ojeda Bustamante et al., 2024).

La modernización del riego parcelario debe adaptarse a los cultivos, suelos, pendiente, disponibilidad de energía y capacidades de los productores. El riego por goteo puede ser apropiado para huertos y hortalizas; la microaspersión, para determinados frutales; y la aspersión, para algunos cultivos extensivos. No obstante, los sistemas de riego superficial bien diseñados y operados también pueden alcanzar un desempeño competitivo (Chávez et al., 2022).

La selección tecnológica no debe basarse en una jerarquía simplificada que considere siempre superior al riego por goteo. Los sistemas presurizados implican costos de energía, filtración, mantenimiento y reemplazo y pueden operar por debajo del diseño cuando existe agua con sedimentos, restricciones financieras o suministro irregular.

La experiencia mexicana indica que el diseño hidráulico, el nivelado del terreno, el control del caudal y la asistencia técnica pueden mejorar notablemente el riego por superficie. Chávez et al. (2022) midieron eficiencias de aplicación de agua que alcanzaron o superaron el 90 % en algunos casos y aumentos en la productividad del agua para el sorgo, la cebada y el maíz, respectivamente. Estos resultados muestran que la modernización no exige un desmantelamiento total y reemplazo de la infraestructura existente.

El tercer resultado es que la programación del riego puede producir beneficios con inversiones menores que una conversión tecnológica completa. Permite ajustar fechas y láminas según la evapotranspiración, la hu-

medad del suelo y los pronósticos. Su efecto depende de servicios de extensión capaces de transformar los datos en recomendaciones precisas.

Una plataforma estatal podría integrar estaciones meteorológicas, niveles de presas, caudales, humedad del suelo, pronósticos y alertas. La información debe ofrecerse en formatos accesibles y acompañarse de instrucciones, sin excluir a productores con menor conectividad o habilidades digitales.

La predicción de sequías puede apoyar decisiones anticipadas sobre superficies, cultivos, calendarios y reservas. Los modelos de aprendizaje automático aplicados al Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado muestran potencial para Chihuahua. Su incorporación a la política requiere validación continua y protocolos que vinculen las alertas con respuestas previamente definidas (Melchor Varela y Ramírez Hernández, 2024).

El cuarto hallazgo es que la eficiencia debe vincularse con los patrones de cultivo. Mejorar el uso por hectárea no resuelve una estructura productiva cuya demanda supera la oferta. La planeación debe considerar duración del ciclo, carácter anual o perenne, valor económico, empleo, consumo hídrico y capacidad de adaptación climática.

El Distrito de Riego 005 combina cultivos con necesidades y grados de flexibilidad distintos. La alfalfa se relaciona con cadenas ganaderas y lecheras; los nogales requieren conservar árboles perennes; y el chile y el cacahuete permiten mayores ajustes entre ciclos. Por ello, las reducciones no deben generalizarse sin estimar sus consecuencias productivas y sociales (Villalobos-Cano et al., 2024).

La reconversión no se logra únicamente mediante prohibiciones. Requiere investigación varietal, contratos de comercialización, seguros, crédito, capacitación y acceso a mercados. Sin certidumbre sobre ingresos, es poco probable que un productor sustituya un cultivo consolidado por otro de menor demanda.

Las empresas agroindustriales también pueden participar mediante la firma de contratos de compra a largo plazo para productos con menor huella hídrica, proporcionando financiamiento para equipos y ofreciendo asistencia técnica. Pero los contratos no deben crear relaciones abusivas que trasladen todos los riesgos a los productores.

Los estándares privados de sostenibilidad pueden impulsar mejoras, pero también excluir a pequeñas unidades incapaces de costear certificaciones o tecnología. En lugar de eliminar proveedores, las empresas tractoras deben ofrecer orientación, financiamiento y plazos de transición.

El quinto hallazgo es que los subsidios deben condicionarse al desempeño. La tecnificación puede justificar apoyo público por sus beneficios ambientales y sociales, pero no debe convertirse en una transferencia sin supervisión. Cada proyecto requiere objetivos, indicadores, seguimiento y evaluación posterior.

El apoyo puede condicionarse a medidores, registros operativos y límites de extracción. Los pagos pueden dividirse entre instalación, puesta en operación y comprobación de resultados después de uno o varios ciclos productivos.

Los proveedores de tecnología pueden participar mediante contratos de desempeño. Una parte del pago se vincularía con uniformidad, menor consumo energético, reducción de volúmenes o mayor productividad, lo que incentiva el mantenimiento del equipo y la capacitación de los usuarios.

La evaluación debe distinguir ahorros brutos y netos. Los primeros corresponden a la diferencia entre volúmenes aplicados antes y después de la intervención; los segundos descuentan la expansión de la superficie, los cambios de cultivo y otras respuestas productivas. Solo los ahorros netos permiten valorar la contribución real sobre la fuente.

Antes de invertir debe definirse el destino de los volúmenes recuperados. Pueden utilizarse para reducir extracciones, favorecer la recuperación de acuíferos, fortalecer reservas, sostener caudales ambientales o abastecer consumo humano. Si permanecen disponibles para ampliar la producción, existe un elevado riesgo de efecto rebote (Ojeda Bustamante et al., 2024).

El sexto resultado es que los esquemas de concertación aplicados en Chihuahua ofrecen una base institucional prometedora. El financiamiento tripartito distribuye la inversión entre la federación, el estado y los productores, lo que puede favorecer apropiación y mantenimiento. Sin embargo, las aportaciones exigidas pueden excluir a quienes carecen de recursos suficientes (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025a).

Los criterios de selección no deben limitarse a la capacidad de pago. Los programas requieren componentes diferenciados para pequeños product-

res, ejidos, comunidades y organizaciones indígenas con menor solvencia. De lo contrario, la inversión puede concentrarse en unidades grandes y aumentar la desigualdad.

La acción colectiva puede superar barreras mediante proyectos compartidos para canales, plantas de bombeo, estaciones meteorológicas o equipos. Los acuerdos deben definir propiedad, operación, mantenimiento y responsabilidades para evitar disputas y deterioro posterior.

El convenio para los distritos 005 y 009 ofrece la oportunidad de construir indicadores desde el inicio. Una inversión superior a 2 300 millones de pesos debe informar avances físicos, costos, superficies, volúmenes recuperados y destino del agua. No puede evaluarse únicamente por kilómetros de obra o equipos instalados (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025b).

Las empresas agroindustriales también pueden colaborar. Su dependencia de proveedores les genera incentivos para reducir riesgos hídricos a lo largo de la cadena. Pueden financiar tecnificación, programas de extensión, trazabilidad e infraestructura compartida.

La participación empresarial debe generar adicionalidad. No deberían usar dinero público para financiar inversiones que una empresa haría de todos modos o únicamente para asegurar su propio abasto. El apoyo debe beneficiar a los productores, las comunidades y los recursos comunes.

El séptimo resultado es el potencial del reúso. Los centros urbanos y las plantas agroindustriales pueden destinar aguas tratadas al riego de cultivos compatibles, producción de forraje, áreas verdes o servicios internos. Esto permite disminuir descargas y sustituir captaciones de mayor calidad (Christou et al., 2024).

La distancia entre la fuente y los usuarios condiciona la viabilidad. La conducción y el bombeo pueden representar una proporción elevada del costo, por lo que los proyectos resultan más favorables cuando las plantas de tratamiento se localizan cerca de las zonas agrícolas o de los centros agroindustriales.

La calidad debe definirse según el uso. Los riesgos son distintos para cultivos consumidos crudos, productos procesados, forrajes, huertos y procesos industriales. La salinidad puede afectar la productividad y la estructura del suelo, mientras que patógenos y contaminantes emergentes requieren

barreras de tratamiento y monitoreo específicas (Christou et al., 2024; Trotta et al., 2024).

Las responsabilidades deben distribuirse con claridad. El operador de la planta responde por la calidad en el punto de entrega; los usuarios, por las prácticas de aplicación; las autoridades, por la regulación y supervisión; y las empresas compradoras, por los estándares de inocuidad. Sin esta definición, cualquier incidente puede generar conflicto y pérdida de confianza.

La colaboración público-privada puede facilitar la infraestructura de reúso. El gobierno puede aportar derechos de vía, regulación o inversión inicial; el operador, tratamiento y control de calidad; las empresas agroindustriales, requisitos contractuales; y los productores, infraestructura parcelaria. Los contratos deben definir volumen, calidad, precio y contingencias.

El octavo hallazgo es la necesidad de gobernanza policéntrica. Las decisiones involucran agua, agricultura, energía, ambiente, financiamiento, desarrollo económico y salud, por lo que no pueden quedar en manos de una sola institución. Conagua debe coordinarse con el gobierno estatal, los distritos de riego, los municipios, las empresas y las organizaciones de productores.

Un sistema común de información es indispensable. Los datos sobre concesiones, cultivos, infraestructura, producción y calidad se encuentran fragmentados entre diversos actores, lo que dificulta evaluar el desempeño. Una plataforma interoperable puede integrar la información sin modificar las responsabilidades institucionales.

Los consejos y comités deben establecer reglas de representación equilibrada. La presencia formal de todos los sectores no es suficiente cuando los usuarios de mayor tamaño dominan las decisiones. Se requieren mecanismos para que participen pequeñas unidades, comunidades rurales, trabajadores y usuarios urbanos.

La transparencia debe incluir criterios de selección, montos, beneficiarios, contratos, indicadores y resultados. La legitimidad de la colaboración desaparece cuando las decisiones se entienden como acuerdos entre autoridades y grandes productores, en ausencia de conocimiento público.

La rendición de cuentas también corresponde a los beneficiarios. Quienes reciben subsidios o infraestructura deben respetar límites, mantener los equipos y proporcionar información. La colaboración implica derechos y obligaciones para todas las partes.

Se propone un modelo integrado de eficiencia hídrica agroindustrial con siete componentes: balance y medición, mantenimiento, programación, tecnología apropiada, reconversión productiva, fuentes alternativas y gobernanza colaborativa basada en los resultados.

El balance y la medición establecen la línea base y permiten verificar resultados. El mantenimiento debe anteceder a nuevas inversiones; la programación ajusta el riego a la demanda real; y la tecnología apropiada selecciona soluciones viables para cada territorio y tipo de productor.

La reconversión productiva vincula el agua con los mercados y la resiliencia. Las fuentes alternativas, incluido el reúso, deben sustituir captaciones cuando sea pertinente. La gobernanza colaborativa distribuye decisiones, riesgos y responsabilidades sin diluir la rectoría pública.

El modelo debe aplicarse en cuatro escalas: parcela, módulo o distrito, cadena agroindustrial y cuenca o acuífero. Una medida solo puede considerarse exitosa cuando el beneficio obtenido en una escala no produce impactos mayores en otra.

Los indicadores deben incluir extracción total, volumen aplicado, consumo consuntivo, productividad física y económica, energía por metro cúbico, superficie tecnificada, funcionamiento de los equipos, reducción neta, calidad del agua reutilizada, participación de pequeños productores y evolución de la fuente.

La evaluación debe mantenerse durante varios años. Un sistema puede funcionar adecuadamente al inicio y deteriorarse después por falta de mantenimiento o cambios productivos. También puede presentarse un efecto rebote cuando el productor amplía la superficie tras comprobar un ahorro inicial. Por ello, el monitoreo debe ser continuo.

Conclusiones

La relación entre producción agroindustrial y agua en Chihuahua es compleja y multiescalar. La agricultura y las cadenas de procesamiento generan empleo, alimentos e ingresos, pero dependen de fuentes superficiales expuestas a sequías y de acuíferos sometidos a abatimiento y sobreexplotación.

La sequía no es excepcional, sino una amenaza persistente que exige planeación. La ayuda de emergencia y la perforación de nuevos pozos no pueden constituir la única respuesta. Se requieren información climática, programación del riego, reconversión y reglas de financiamiento que ajusten la demanda a la disponibilidad.

La eficiencia hídrica tiene varias dimensiones. Mejorar la conducción o la aplicación no garantiza ahorros territoriales cuando se amplía la superficie, se intensifica la producción o disminuyen los retornos aprovechados por otros usuarios. Los programas deben medir la reducción neta de extracción y consumo.

La tecnificación debe adaptarse a las condiciones productivas. Los sistemas presurizados pueden ofrecer beneficios importantes, pero no siempre son la mejor alternativa. El riego superficial bien diseñado y operado puede alcanzar eficiencias elevadas con menores costos energéticos y financieros.

La planeación hídrica no se limita a elegir cultivos. Debe considerar las diferencias entre especies anuales y perennes, el valor económico, el empleo y los vínculos agroindustriales. La reconversión requiere mercados, crédito, asistencia técnica y mecanismos para distribuir riesgos.

La colaboración público-privada abre opciones para financiar infraestructura, tecnología, capacitación y reúso. Los modelos tripartitos de Chihuahua ofrecen una base relevante, pero deben precisar los ahorros netos, el mantenimiento, la propiedad de los activos y el destino de los volúmenes recuperados.

El apoyo público debe vincularse con medición y desempeño. La instalación de infraestructura no constituye por sí misma un resultado. Los programas deben verificar la operación, la reducción de extracciones, la productividad sostenible y la distribución equitativa de los beneficios.

Las empresas agroindustriales pueden financiar a proveedores, brindar asistencia técnica, establecer contratos de compra y cofinanciar infraestructura. Su participación debe generar beneficios territoriales adicionales y no limitarse a asegurar el abastecimiento de grandes empresas.

El reúso de aguas residuales tratadas puede diversificar las fuentes, pero exige tratamiento, monitoreo, trazabilidad y responsabilidades claras. Debe proteger la inocuidad alimentaria, los suelos, los acuíferos y la salud de trabajadores y consumidores.

El modelo propuesto integra balance, medición, mantenimiento, programación, tecnología apropiada, reconversión, fuentes alternativas y gobernanza colaborativa. Debe aplicarse de manera articulada en la parcela, los módulos, las cadenas agroindustriales y las fuentes compartidas.

La sostenibilidad hídrica futura del sector dependerá de que la cooperación modifique los incentivos. El propósito no es prolongar artificialmente la producción mediante la explotación de una fuente agotada, sino mantener actividades económicamente viables dentro de límites hidrológicos verificables y socialmente legítimos.

Referencias

- Adla, S., Pande, S., Vico, G., Vora, S., Alam, M. F., Basel, B., Haeffner, M., y Sivapalan, M. (2023). Place for sociohydrology in sustainable and climate-resilient agriculture: Review and ways forward. *Cambridge Prisms: Water*, 1, e19. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.16>
- Brears, R. C. (2023). Public-private partnerships financing water security and green growth. En R. C. Brears, *Financing water security and green growth* (pp. 127–144). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780192847843.003.0009>
- Chávez, C., Fuentes, S., Fuentes, C., Brambila-Paz, F., y Trejo-Alonso, J. (2022). How surface irrigation contributes to climate change resilience: A case study of practices in Mexico. *Sustainability*, 14(13), 7689. <https://doi.org/10.3390/su14137689>
- Christou, A., Beretsou, V. G., Iakovides, I. C., Karaolia, P., Michael, C., Benmarhnia, T., Chefetz, B., Donner, E., Gawlik, B. M., Lee, Y., Lim, T. T., Lundy, L., Maffettone, R., Rizzo, L., Topp, E., y Fatta-Kassinos, D. (2024). Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nature Reviews Earth y Environment*, 5(7), 504–521. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). Disponibilidad media anual de agua subterránea en los acuíferos del estado de Chihuahua. Gobierno de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/Gas1/sections/Edos/chihuahua/chihuahua.html>
- Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., Botzen, W., y Tol, R. S. J. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, 22, 126. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2024, 12 de marzo). Dan seguimiento a estrategia contra la sequía previo al inicio del ciclo agrícola 2024. <https://www.chihuahua.gob.mx/prensa/dan-seguimiento-estrategia-contra-la-sequia-previo-al-inicio-del-ciclo-agricola-2024>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2025a, 26 de mayo). Concluye revisión técnica de obras 2024 del Programa de Uso Sustentable del Agua. <https://www.chihuahua.gob.mx/prensa/concluye-revision-tecnica-de-obras-2024-del-programa-de-uso-sustentable-del-agua>

- gob.mx/prensa/concluye-revision-tecnica-de-obras-2024-del-programa-de-uso-sustentable-del-agua
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2025b, 3 de abril). Formalizan Estado y Federación convenio para la tecnificación de los distritos de Riego 005 Delicias y 009 Valle de Juárez. <https://chihuahua.gob.mx/prensa/formalizan-estado-y-federacion-convenio-para-la-tecnificacion-de-los-distritos-de-riego-005>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2025c, 14 de octubre). Aprueba Estado obras del Programa Especial de Infraestructura Hidroagrícola 2025. <https://www.chihuahua.gob.mx/prensa/aprueba-estado-obras-del-programa-especial-de-infraestructura-hidroagricola-2025>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2026, 19 de marzo). Invierte Secretaría de Desarrollo Rural 166 mdp en el cuidado del campo y de los recursos forestales. <https://www.chihuahua.gob.mx/prensa/invierte-secretaria-de-desarrollo-rural-166-mdp-en-el-cuidado-del-campo-y-de-los-recursos>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public–private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467–482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Mejía-de la Rosa, D., Sánchez-Escudero, J., Ocampo-Fletes, I., y Flores-Sánchez, D. (2024). Autogestión en el manejo y distribución del agua de uso agrícola: Caso Pozo Zamorano, Hidalgo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(2), 207–247. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-02-05>
- Melchor Varela, J. A., y Ramírez Hernández, J. I. (2024). Prediction of hydrological drought by the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Chihuahua, Mexico, using machine learning algorithms. *Atmósfera*, 38, 687–697. <https://doi.org/10.20937/ATM.53355>
- Mendieta-Mendoza, A., Hanson, R. T., y Rentería-Villalobos, M. (2021). Potential adverse impacts on vulnerability and availability of groundwater from climate-change and land use. *Journal of Hydrology*, 594, 125978. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125978>
- Ojeda Bustamante, W., Palerm Viqueira, J., y Muñoz-Arriola, F. (2024). Las paradojas de la eficiencia de riego vinculadas con la modernización de zonas irrigadas: Cuentos y cuentas. *Revista de El Colegio de San Luis*, 14(25), e1598. <https://doi.org/10.21696/rcsl142520241598>
- Rivera-Nuñez, I. M., Luque Agraz, D., Murphy, A. D., y Jones, E. C. (2023). Analysis of social networks of water-use-related information in the Rio Mayo Irrigation District (038) in northern Mexico: Ethnicity, land tenure and land use. *Water*, 15(12), 2288. <https://doi.org/10.3390/w15122288>
- Trotta, V., Baaloudj, O., y Brienza, M. (2024). Risks associated with wastewater reuse in agriculture: Investigating the effects of contaminants in soil, plants, and insects. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1358842. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1358842>
- Valdivia-Cabral, J. J., Ortiz-Medina, I., y Hernández-Ortiz, M. (2024). Towards sustainable water management in Mexico: Agroecological innovation and polycentric

- governance. *Scientia et Praxis*, 4(8), 1-31. <https://doi.org/10.55965/setp.4.08.uady.a1>
- Villalobos-Cano, O., Santellano-Estrada, E., Stringam, B. L., Grover, K., y Esparza-Vela, E. (2024). Estimating water use efficiency for major crops in Chihuahua, Mexico: Crop yield function models vs. evapotranspiration. *Sustainability*, 16(5), 1851. <https://doi.org/10.3390/su16051851>

5. Guanajuato: economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero*

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.05>

Resumen

Guanajuato concentra actividades agroalimentarias, agroindustriales y manufactureras cuyo desarrollo se encuentra condicionado por la presión sobre los acuíferos, la competencia entre usos y las descargas urbanas y productivas. El objetivo del capítulo es analizar, desde una perspectiva teórica y documental, las condiciones para incorporar la economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero del estado. La revisión integra aportes sobre circularidad, reúso, recuperación de recursos, simbiosis industrial, modelos de negocio y colaboración público-privada. Los resultados indican que la circularidad no debe limitarse al tratamiento al final de la tubería, sino comenzar con prevención, medición, separación de corrientes y recirculación interna, para posteriormente incorporar agua regenerada y recuperar energía, nutrientes y materiales. Se propone un modelo territorial articulado en tres escalas: empresa, parque industrial o cadena productiva, y cuenca o acuífero. Se concluye que la transición circular puede reducir la dependencia de fuentes convencionales cuando los intercambios son verificables, técnica y económicamente viables y no generan efectos rebote ni trasladan contaminantes a otros usos o compartimentos ambientales.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577> ; Scopus ID: 572 24399366 ; correo electrónico: dmonroyb@ipn.mx

Palabras clave: *economía circular, reúso de agua, simbiosis industrial, agroindustria.*

Introducción

Guanajuato posee una estructura económica compleja que combina agricultura de riego, producción pecuaria, procesamiento de alimentos, industria automotriz y de autopartes, metalurgia, productos químicos, curtiduría, calzado y otras manufacturas. Esta concentración ha impulsado el crecimiento económico y la integración de cadenas nacionales e internacionales, pero también ha incrementado la demanda de agua y la generación de efluentes con características diversas (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024; Sandoval Cabrera et al., 2024).

La agroindustria articula la producción primaria con el acondicionamiento, conservación, envasado, procesamiento y comercialización de granos, hortalizas, frutas, productos cárnicos, lácteos y alimentos procesados. El agua se utiliza en riego, lavado de materias primas, limpieza y desinfección de equipos, enfriamiento, generación de vapor, transporte y servicios sanitarios. Estas actividades generan corrientes con materia orgánica, sólidos, grasas, detergentes y microorganismos que requieren tratamiento antes de su descarga o reúso (Abdulla et al., 2023; Crovella et al., 2024).

Las actividades manufactureras presentan necesidades distintas. La industria automotriz y de autopartes emplea agua en limpieza de componentes, preparación y tratamiento de superficies, cabinas de pintura, sistemas de enfriamiento, calderas, pruebas y servicios generales. El consumo varía entre ensambladoras, fabricantes de componentes y proveedores de mecanizado o tratamiento superficial, por lo que el análisis debe abarcar la cadena de suministro y no limitarse a las plantas de ensamble (Sandoval Cabrera et al., 2024).

La industria del cuero y el calzado posee especial relevancia en León y municipios cercanos. Las etapas de remojo, encalado, curtido, recurtido, teñido y acabado utilizan agua, sales, sulfuros, colorantes y compuestos de cromo. Sus efluentes pueden contener elevadas concentraciones de sólidos, materia orgánica, sales, sulfuros y metales, lo que exige separación de

corrientes y tratamiento adecuado antes de su reúso o descarga (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2022; Kumar et al., 2023).

Estas actividades se desarrollan en un contexto de presión sobre las aguas subterráneas. Datos de la Comisión Nacional del Agua indican que 13 de los 18 acuíferos de Guanajuato presentan disponibilidad negativa. Entre los mayores déficits se encuentran Valle de Celaya, Pénjamo-Abasolo, Cuenca Alta del Río Laja, Valle de León, Irapuato-Valle y Río Turbio. El déficit estimado alcanza aproximadamente 156.45 hectómetros cúbicos anuales en Valle de Celaya y 126.11 en Pénjamo-Abasolo (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2023).

La disponibilidad negativa no significa que el acuífero se encuentre completamente seco, sino que la recarga media anual, una vez descontada la descarga natural comprometida, resulta inferior a los volúmenes concesionados o extraídos. Mantener un modelo basado en nuevos pozos o mayores extracciones puede acelerar el abatimiento, elevar los costos energéticos y reducir la capacidad de respuesta ante sequías (Conagua, 2023).

La presión sobre los acuíferos refleja la interdependencia entre agricultura, ciudades e industrias. Una empresa puede contar con una concesión y permanecer expuesta porque la fuente regional continúa deteriorándose. Asimismo, una mejora de eficiencia interna no produce un beneficio territorial cuando el volumen ahorrado se utiliza para ampliar la producción o incrementar extracciones en otro eslabón de la cadena (Delgado et al., 2024; Morseletto et al., 2022).

Sandoval Cabrera et al. (2024) explican que la estrategia de localización y expansión de la cadena automotriz de Guanajuato no ha incorporado suficientemente la sostenibilidad de los recursos hídricos. Las autoras identifican procesos intensivos en consumo y contaminación, además de brechas regulatorias y de supervisión sobre asignaciones y descargas. Sus resultados muestran la necesidad de analizar conjuntamente la competitividad industrial, la disponibilidad territorial y la rendición de cuentas de la cadena de suministro.

La planeación estatal plantea reducir la sobreexplotación, modernizar el riego, incrementar el tratamiento y el reúso y fortalecer la coordinación sectorial. El Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato 2050 y la Estrategia de Agua para Guanajuato Visión 2050 buscan relacionar disponibilidad,

desarrollo económico, sostenibilidad ambiental y adaptación climática (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024).

En este contexto, la economía circular ofrece una alternativa al modelo lineal de extraer, usar y desechar. Aplicada al agua, propone reducir la demanda, prolongar su permanencia en los procesos, reutilizar corrientes con calidad adecuada, recuperar energía y materiales y contribuir a regenerar los sistemas naturales. Las aguas residuales dejan de considerarse únicamente un desecho y pueden representar una fuente de agua, materia orgánica, nutrientes, calor y otros recursos aprovechables (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Silva, 2023).

La circularidad puede desarrollarse dentro de una empresa, entre organizaciones de un parque industrial, entre ciudades e industrias o entre los sectores manufacturero y agrícola. Una planta municipal puede suministrar agua regenerada a usuarios industriales; una instalación agroindustrial puede recuperar energía de efluentes orgánicos; y una empresa puede entregar agua tratada para usos no potables. Estas redes de intercambio forman parte de la simbiosis industrial (Georgiou et al., 2023; Ramin et al., 2024).

El reúso y la recuperación no son sostenibles por definición. Los tratamientos pueden exigir energía y productos químicos; los contaminantes concentrados pueden generar residuos difíciles de gestionar; y una nueva fuente circular puede incentivar el crecimiento del consumo. La evaluación debe considerar el ciclo de vida, los costos de largo plazo, la calidad, la salud y el balance territorial (Crovella et al., 2024; Delgado et al., 2024).

El capítulo analiza los impulsores, oportunidades y condiciones de viabilidad de la economía circular del agua en los sectores agroindustrial y manufacturero de Guanajuato. La pregunta de investigación es la siguiente: ¿qué componentes tecnológicos, económicos e institucionales debe integrar un modelo circular capaz de reducir extracciones, reutilizar efluentes y generar beneficios verificables para las empresas y el territorio?

La premisa central es que la economía circular del agua no puede definirse únicamente mediante el porcentaje de reúso dentro de una empresa. Una estrategia circular debe demostrar que reduce las extracciones de fuentes vulnerables, disminuye contaminantes, evita la transferencia de riesgos y produce beneficios a escala de cuenca o acuífero. La eficiencia de un circuito interno resulta insuficiente cuando el balance territorial continúa siendo negativo.

Aproximación teórica y conceptual

La economía circular es un sistema orientado a minimizar residuos y mantener recursos, productos y materiales en uso durante el mayor tiempo posible. Frente al modelo lineal de extracción, transformación, uso y eliminación, propone ciclos que conservan el valor de los recursos. Aplicada al agua, modifica la relación entre abastecimiento, producción, tratamiento y descarga (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Morsetto et al., 2022).

La circularidad del agua puede organizarse mediante una jerarquía de acciones. La primera consiste en evitar consumos innecesarios; la segunda, reducir la demanda mediante eficiencia; la tercera, recircular el agua dentro de un proceso; la cuarta, reutilizar corrientes tratadas en otros procesos; la quinta, intercambiar agua entre organizaciones; la sexta, recuperar energía, nutrientes o materiales; y la séptima, contribuir a la regeneración de las fuentes naturales (Delgado et al., 2024).

La jerarquía resulta importante porque el tratamiento no debe sustituir la prevención. Una empresa puede instalar tecnología avanzada y conservar procesos innecesariamente intensivos. Reducir la demanda en el origen disminuye la extracción, el volumen que requiere tratamiento, el consumo energético y la generación de lodos o concentrados (Morsetto et al., 2022; Silva, 2023).

El balance hídrico es el punto de partida de la circularidad. Permite identificar fuentes, cantidades, usos, pérdidas, recirculación, descargas y características de las corrientes de una instalación. Debe distinguir extracción, consumo consuntivo, agua incorporada al producto, evaporación, reúso y efluentes. Sin esta separación, una empresa puede contabilizar varias veces el mismo volumen recirculado y divulgar porcentajes que no corresponden a una reducción equivalente de la extracción (Delgado et al., 2024).

Otro principio básico es utilizar una calidad adecuada para cada uso. No todas las actividades requieren agua potable. El agua regenerada puede emplearse en enfriamiento, limpiezas preliminares, riego de áreas verdes, control de polvo y servicios sanitarios, siempre que cumpla los requisitos correspondientes. El tratamiento debe ajustarse al riesgo y evitar tanto el

subtratamiento como el uso innecesario de tecnologías costosas (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Georgiou et al., 2023).

El uso en cascada consiste en destinar el agua de mayor calidad a los procesos más exigentes y reutilizarla posteriormente en actividades con requisitos menores. Por ejemplo, una corriente empleada en un enjuague final puede recuperarse para un enjuague previo; el agua de condensación puede reincorporarse a las calderas; y algunos efluentes tratados pueden utilizarse en torres de enfriamiento. Esta secuencia mantiene el agua dentro del sistema y reduce la demanda de agua fresca (Ramin et al., 2024).

La recirculación interna es la forma más inmediata de circularidad empresarial. Ofrece mayor control de calidad, menores distancias de transporte y menor dependencia de terceros. Sin embargo, puede concentrar sales, materia orgánica, microorganismos y sustancias específicas, por lo que requiere tratamientos de control y purgas adecuadas (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

La simbiosis industrial amplía la circularidad más allá de una empresa mediante el intercambio de agua, energía, infraestructura, residuos o subproductos. Su viabilidad depende de compatibilidad técnica, proximidad, continuidad de los caudales, confianza, contratos y responsabilidades claras. En esas condiciones, una corriente residual de una instalación puede convertirse en insumo de otra sin volverse a una simple eliminación de residuos (Ramin et al., 2024; Rentería Núñez y Perez-Castillo, 2023).

Ramin et al. (2024) identifican diversas innovaciones hídricas en la simbiosis industrial, entre ellas fuentes alternativas compartidas, tratamiento conjunto, recuperación de agua, energía y materiales e intercambio de corrientes entre procesos. Los casos revisados muestran la relevancia de la infraestructura común y de la coordinación, pues los intercambios espontáneos entre empresas son poco frecuentes.

Los corredores industriales de Guanajuato concentran empresas automotrices, metalúrgicas, químicas, alimentarias, logísticas y de servicios. Esta proximidad puede favorecer redes de agua regenerada, plantas compartidas, laboratorios, gestión conjunta de lodos y sistemas comunes de monitoreo. La diversidad de efluentes, sin embargo, obliga a evitar mezclas que dificulten la recuperación o incrementen los riesgos.

La simbiosis agroindustrial vincula la producción agrícola, la transformación de alimentos, el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de materiales mediante un enfoque de ciclo de vida. Los procesos anaerobios pueden tratar efluentes con alta carga orgánica; los nutrientes pueden reutilizarse bajo condiciones controladas; y el agua regenerada puede destinarse al riego o a usos complementarios. Estas opciones transforman las instalaciones de tratamiento en centros de recuperación de recursos (Abdulla et al., 2023; Crovella et al., 2024).

La digestión anaerobia transforma parte de la materia orgánica en biogás y reduce la carga contaminante. Puede resultar adecuada para efluentes lácteos, cárnicos, cerveceros, de bebidas y de procesamiento de alimentos, pero su desempeño depende de composición, temperatura, pH, grasas y variabilidad del caudal. El digestato y los lodos deben analizarse antes de su aprovechamiento agronómico (Abdulla et al., 2023; Silva, 2023).

La recuperación de nutrientes puede disminuir el uso de fertilizantes sintéticos, pero debe evitar el retorno de patógenos, metales, sales y contaminantes emergentes al suelo. El valor agronómico no puede evaluarse solo por las concentraciones de nitrógeno y fósforo; requiere considerar la seguridad sanitaria y el ciclo de vida ambiental (Crovella et al., 2024).

En manufactura, la recuperación puede abarcar agua, calor, metales y productos químicos. Las soluciones de baño, aceites, catalizadores o metales resultan más recuperables cuando las corrientes se mantienen segregadas. Los efluentes mezclados reducen el valor de los componentes y aumentan los costos de tratamiento, por lo que la separación en el origen es una condición previa (Kumar et al., 2023; Ramin et al., 2024).

Entre las opciones manufactureras se encuentran el lavado en contracorriente, la recuperación de condensados, la optimización de cabinas de pintura, la recirculación en torres de enfriamiento y el tratamiento de corrientes laterales. Las empresas tractoras también pueden establecer estándares hídricos para proveedores y facilitar iniciativas colectivas en parques industriales (Loza Hernandez y Arroyo, 2023; Sandoval Cabrera et al., 2024).

Por otro lado, los estándares privados pueden ser excluyentes en casos en que los proveedores más pequeños no tienen el capital o la capacidad técnica. Las grandes empresas deberían justificar sus exigencias ofreciendo capacitación, financiamiento, transferencia tecnológica y plazos para la

transición. De lo contrario, la sostenibilidad se convierte en un obstáculo para el acceso y no en una herramienta de valorización de la cadena de suministro (Loza Hernandez y Arroyo, 2023).

En la curtiduría, las corrientes con cromo deben separarse de aquellas que contienen sulfuros, sales o materia orgánica. La segregación facilita la recuperación, mejora el tratamiento y evita reacciones peligrosas. Los procesos fisicoquímicos, biológicos, de oxidación avanzada y de membranas pueden producir agua reutilizable, pero deben evaluarse sus costos, el ensuciamiento y la gestión de concentrados (Kumar et al., 2023).

La recuperación de cromo reduce la demanda de materias primas y la carga contaminante, pero exige control de calidad y gestión segura de lodos. Una tecnología que retira el contaminante del agua sin resolver el destino del residuo solo traslada el problema de un medio a otro (Kumar et al., 2023).

La economía circular también puede generar efectos rebote. Una mejora relativa reduce el uso por unidad y puede disminuir los costos, pero esos ahorros pueden impulsar una expansión que incremente la extracción total. Por ello, los indicadores de eficiencia deben complementarse con metas absolutas relacionadas con la disponibilidad de la fuente (Delgado et al., 2024; Morseletto et al., 2022).

El agua tratada puede producir otro efecto rebote cuando se incorpora sin límites a la oferta. El reúso debe sustituir volúmenes convencionales y no convertirse en una fuente adicional para ampliar indiscriminadamente la demanda urbana, comercial o industrial (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

El análisis del ciclo de vida permite comparar los beneficios de la recuperación de agua y materiales con los impactos derivados de la energía, los reactivos, las membranas, el transporte y la gestión de residuos. Crovella et al. (2024) demuestran que, si bien el análisis del ciclo de vida puede ser una herramienta útil para identificar las opciones más sostenibles en sistemas agroindustriales, los resultados son sensibles a los límites y supuestos impuestos, así como a las condiciones locales.

Los modelos de negocio condicionan la permanencia de las iniciativas. Las opciones incluyen inversión propia, tratamiento como servicio, compra de agua regenerada, infraestructura compartida y venta de subproductos recuperados. Cada modelo distribuye de manera distinta los costos, ingre-

sos, riesgos tecnológicos y responsabilidades (Rentería Núñez y Perez-Castillo, 2023).

Los contratos de largo plazo pueden brindar certidumbre para desarrollar redes circulares. El operador necesita una demanda mínima que permita recuperar la inversión, mientras que los usuarios requieren continuidad, calidad y precios previsibles. Los acuerdos deben definir volúmenes, parámetros, mantenimiento, ampliaciones, datos, monitoreo, contingencias y respuesta ante incumplimientos (Georgiou et al., 2023).

La colaboración público-privada puede facilitar el suministro de agua tratada desde plantas municipales hacia usuarios industriales. Las autoridades aportan planeación, autorizaciones e infraestructura; las empresas, demanda estable, inversión complementaria y capacidad de pago; y los operadores especializados, tratamiento avanzado. La distancia, la calidad, las tarifas, la comunicación y la asignación de riesgos determinan la viabilidad (Georgiou et al., 2023).

La participación privada no elimina la supervisión pública. Las autoridades deben proteger el consumo humano, vigilar la calidad, prevenir impactos acumulativos y asegurar que los beneficios no se concentren exclusivamente en las empresas participantes. Los contratos deben ser transparentes y utilizar indicadores verificables (Georgiou et al., 2023).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. El diseño permitió relacionar economía circular, gestión hídrica, tratamiento de efluentes, simbiosis industrial, recuperación de recursos y colaboración público-privada.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos estatales de planeación, datos oficiales sobre disponibilidad subterránea y estudios de los sectores automotriz, agroindustrial y de curtido. Se priorizaron referencias de 2022 a 2025 y se incorporaron algunos antecedentes de 2021 por su relevancia conceptual.

Las búsquedas, en español e inglés, utilizaron términos relacionados con economía circular del agua, reúso industrial, simbiosis industrial,

recuperación de recursos, aguas residuales agroindustriales, industria automotriz, curtiduría, acuíferos y Guanajuato.

Los criterios de selección fueron pertinencia para la pregunta de investigación, origen académico u oficial, actualidad y claridad metodológica.

Las búsquedas se complementaron con combinaciones de los términos anteriores para ampliar la cobertura de la literatura y localizar estudios aplicables al contexto estatal.

Se excluyeron materiales promocionales, documentos sin sustento verificable y publicaciones que presentaban la circularidad como un resultado automático de la instalación de tecnología.

Limitaciones del estudio

Los resultados constituyen una síntesis teórica. No pretenden calcular el consumo de empresas específicas ni diseñar una red concreta de intercambios y precios. La falta de información pública homogénea sobre balances empresariales, calidad y volumen de efluentes, costos y agua reutilizada limita la evaluación de proyectos y constituye uno de los problemas identificados.

Resultados

El primer resultado es que Guanajuato posee condiciones para desarrollar una economía circular del agua. La concentración de actividades agrícolas, agroindustriales y manufactureras genera demanda, efluentes diversos y proximidad entre posibles usuarios. Además, el déficit de varios acuíferos incrementa la necesidad de reducir extracciones y utilizar fuentes alternativas (Conagua, 2023; Gobierno del Estado de Guanajuato, 2025).

Estas condiciones no garantizan la viabilidad de cualquier intercambio. Los proyectos pueden fracasar por distancia, incompatibilidad de calidad, variación de caudales, costos de bombeo o responsabilidades mal definidas. La circularidad debe partir de un diagnóstico territorial y no limitarse a conectar generadores y usuarios (Georgiou et al., 2023; Ramin et al., 2024).

El diagnóstico debe identificar fuentes, usuarios principales, plantas de tratamiento, corredores industriales, zonas agrícolas, elevaciones y redes existentes. También debe clasificar los efluentes por caudal, composición, estacionalidad y posibilidades de reúso. Esta información permite detectar intercambios técnica, energética y económicamente viables.

El segundo resultado es que la prevención debe anteceder al tratamiento. Las auditorías hídricas permiten identificar consumos innecesarios, fugas, desbordamientos, limpiezas ineficientes y procesos susceptibles de rediseño. Reducir el uso en la fuente disminuye simultáneamente los costos de abastecimiento y tratamiento (Morseletto et al., 2022; Silva, 2023).

Las auditorías deben establecer líneas base con medidores en procesos clave. El volumen total de la planta no basta para detectar oportunidades ni comparar productividad. Los indicadores por unidad producida deben acompañarse de metas absolutas para impedir que el crecimiento anule las mejoras relativas (Delgado et al., 2024).

La digitalización puede apoyarse en sensores, caudalímetros, sistemas de control y alertas de desviación. Sin embargo, los equipos requieren calibración, mantenimiento y capacitación para interpretar los datos. La adquisición de tecnología sin cambios organizacionales produce beneficios limitados (Loza Hernandez y Arroyo, 2023).

La separación de corrientes es la base técnica de la circularidad. Debe evitarse la mezcla de efluentes relativamente limpios con corrientes altamente contaminadas. La segregación permite tratamientos diferenciados, ayudando así a retener el agua y los componentes recuperables (Kumar et al., 2023; Ramin et al., 2024).

En agroindustria pueden separarse el agua de enfriamiento, los condensados, los primeros enjuagues, las corrientes de alta carga orgánica y los servicios sanitarios. El agua de enfriamiento o condensación requiere menos tratamiento que los efluentes con grasas, proteínas, azúcares y sólidos (Abdulla et al., 2023).

En la industria automotriz pueden segregarse enjuagues, corrientes de pintura, aguas aceitosas, baños de tratamiento y servicios generales. Esta distinción facilita la recuperación, reduce la carga de las plantas y permite identificar contaminantes que limitarían usos posteriores agrícolas o municipales (Sandoval Cabrera et al., 2024).

En las curtidurías no deben mezclarse corrientes con cromo y sulfuro. La combinación incrementa la complejidad, dificulta la recuperación y puede generar reacciones peligrosas. La segregación facilita el pretratamiento y la recuperación de materiales y agua (Kumar et al., 2023).

El cuarto resultado corresponde a la recirculación interna. Las opciones incluyen enjuague en contracorriente, recuperación de condensados, reúso de agua de rechazo, optimización de torres de enfriamiento y circuitos cerrados. Como la empresa controla la fuente y el uso, estas alternativas suelen enfrentar menos barreras institucionales.

La recirculación debe respetar límites de calidad. Un mayor número de ciclos puede concentrar sales, dureza, materia orgánica o microorganismos. Cada proceso debe definir los ciclos, purgas y tratamientos necesarios para prevenir corrosión, incrustaciones, fallas y riesgos para el producto o la salud (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

Los sistemas de descarga líquida cero pueden ser técnicamente viables, pero no deben convertirse en un objetivo universal. La evaporación, cristalización y gestión de concentrados pueden requerir mucha energía. La decisión debe basarse en análisis de ciclo de vida y en las características de cada efluente (Delgado et al., 2024).

El quinto resultado es el reúso externo. Las aguas residuales tratadas de manera confiable pueden destinarse a enfriamiento, calderas, limpieza o servicios en parques cercanos. La sustitución permite reservar agua subterránea de mayor calidad para usos prioritarios y reducir descargas a cuerpos receptores (Georgiou et al., 2023).

Las redes de agua regenerada requieren demanda estable. Las empresas usuarias pueden contratar volúmenes mínimos o mecanismos de pago que financien tratamiento y conducción. A cambio, necesitan claridad sobre calidad, continuidad y protocolos de contingencia (Georgiou et al., 2023).

La tarifa debe cubrir tratamiento, bombeo, operación y mantenimiento y reconocer los beneficios públicos de reducir extracciones y descargas. Un precio artificialmente bajo genera subsidios injustificados, mientras que uno superior al agua convencional dificulta la sustitución. Los instrumentos económicos deben cerrar esta brecha sin trasladar costos excesivos a los hogares.

El agua industrial tratada puede utilizarse en agricultura bajo condiciones controladas. La decisión requiere analizar sales, metales, patógenos y

contaminantes específicos. El tratamiento convencional no vuelve automáticamente aptos para riego todos los efluentes industriales (Crovella et al., 2024).

El reúso de efluentes de procesos alimentarios puede ser más sencillo cuando cumplen los requisitos aplicables. Aun así, deben analizarse detergentes, desinfectantes, nutrientes y materia orgánica, cuya composición varía según temporadas, materias primas y lotes de producción (Abdulla et al., 2023).

El sexto resultado es la recuperación de energía. Los digestores anaerobios pueden tratar efluentes agroindustriales con alta carga orgánica y producir biogás. La energía obtenida puede utilizarse como calor, electricidad o combustible, al mismo tiempo que disminuye la demanda química y bioquímica de oxígeno (Abdulla et al., 2023; Silva, 2023).

La viabilidad depende del caudal, la concentración, la continuidad y la temperatura. Las instalaciones pequeñas enfrentan costos unitarios mayores, por lo que pueden beneficiarse de plantas compartidas o centros regionales. La codigestión de corrientes puede aumentar el rendimiento, pero exige controlar inhibidores y variabilidad.

La recuperación de energía reduce la carga orgánica, pero no elimina la necesidad de tratamiento posterior. El efluente y el digestato pueden conservar nutrientes, sólidos y microorganismos y deben evaluarse antes de su aprovechamiento. La gestión debe abarcar todos los productos y residuos del proceso, no solo el componente con valor comercial (Crovella et al., 2024).

El séptimo resultado es la recuperación de materiales. Las aguas residuales pueden contener nutrientes, metales, compuestos químicos y sólidos con valor potencial. Su recuperación disminuye la carga contaminante y puede generar ingresos, siempre que exista mercado, calidad estable y costos competitivos (Ramin et al., 2024).

En las curtidurías, la recuperación de cromo constituye una oportunidad relevante. El material puede reincorporarse cuando cumple las especificaciones, y el agua tratada puede reutilizarse en etapas compatibles. Los residuos finales y lodos deben estabilizarse y gestionarse con seguridad (Kumar et al., 2023).

La agroindustria puede recuperar nutrientes, grasas, proteínas, fibras, compuestos bioactivos y materia orgánica. Según las condiciones sanitarias

y regulatorias, estos recursos pueden destinarse a fertilizantes, alimentos para animales, materiales, energía u otros productos de mayor valor (Abdulla et al., 2023).

El octavo resultado es el potencial de simbiosis en parques y corredores. Guanajuato concentra empresas manufactureras vinculadas por servicios y proximidad logística, lo que puede facilitar plantas compartidas, redes duales, laboratorios y sistemas de emergencia (Ramin et al., 2024).

La infraestructura compartida reduce costos mediante economías de escala, pero crea interdependencias. Una falla puede afectar a todos los usuarios. Los contratos deben especificar capacidad, calidad, responsabilidades, mantenimiento, ampliaciones, datos, respaldo y respuesta ante incumplimientos.

La infraestructura colectiva no debe mezclar indiscriminadamente efluentes que pierdan su potencial de recuperación. El modelo puede combinar pretratamientos obligatorios en cada empresa con tratamiento avanzado compartido.

La coordinación puede recaer en un organismo público, una empresa especializada o una asociación del parque. La elección depende de capacidades, financiamiento y riesgos, pero en todos los casos se requieren supervisión pública y transparencia sobre el desempeño.

El noveno resultado es la integración de las cadenas de suministro. Las empresas automotrices y alimentarias pueden exigir balances hídricos, eficiencia, calidad de descargas y planes de contingencia a sus proveedores, que pueden concentrar una parte importante del impacto total (Loza Hernández y Arroyo, 2023; Sandoval Cabrera et al., 2024).

Los requisitos deben diferenciarse por escala y riesgo. Una pequeña empresa no puede implementar de inmediato sistemas equivalentes a los de una corporación internacional. Las empresas tractoras pueden crear fondos, consolidar compras, establecer centros compartidos y ofrecer asistencia técnica.

La trazabilidad permite identificar dónde y cuándo se utiliza el agua y dónde se generan los impactos. No debe convertirse en una carga administrativa que excluya proveedores sin producir mejoras. Los indicadores deben ser útiles, verificables y relacionarse con las fuentes locales.

El décimo resultado es que los modelos de negocio deben distribuir costos y valor de manera equitativa. El financiamiento puede provenir de

inversión empresarial, fondos públicos, créditos verdes, contratos de desempeño o tarifas. La elección debe considerar quién genera la demanda, quién recibe los ahorros y quién asume los riesgos (Georgiou et al., 2023; Rentería Núñez y Perez-Castillo, 2023).

Los contratos de desempeño pueden vincular la remuneración con el volumen neto ahorrado, la calidad entregada o la energía recuperada. Este esquema reduce el riesgo de adquirir equipos ineficaces, pero depende de líneas base confiables y verificación independiente.

La participación pública se justifica cuando un proyecto reduce la presión sobre un acuífero, mejora la calidad ambiental o beneficia a varios usuarios. Los subsidios no deben financiar exclusivamente ahorros operativos de empresas capaces de realizar la inversión por sí mismas.

El undécimo resultado es la prevención del efecto rebote. Cada proyecto debe definir el destino del volumen ahorrado o sustituido. El agua regenerada debe reemplazar extracción subterránea o superficial, no sumarse a ella para ampliar la producción.

La sustitución debe verificarse mediante mediciones y registros de extracción. Los porcentajes de reúso no son suficientes. El indicador principal es el volumen de agua convencional que deja de utilizarse, acompañado de datos sobre consumo consuntivo y descarga.

La reducción absoluta solo ocurre cuando los ahorros tecnológicos y la sustitución superan el crecimiento productivo. Esta condición debe demostrarse. La circularidad empresarial debe relacionarse con la evolución territorial de la fuente.

El duodécimo resultado es la importancia de la gobernanza multinivel. Las empresas controlan sus procesos; los parques operan infraestructura compartida; los municipios prestan servicios; y el estado define políticas y coordina a los actores. La circularidad exige armonizar estas funciones.

La fragmentación regulatoria puede retrasar proyectos o dejar vacíos. Deben coordinarse permisos de descarga, contratos de suministro, derechos de vía, estándares de calidad y requisitos sanitarios sin reducir los controles.

Los balances, contratos públicos, parámetros de calidad, subsidios, costos y resultados deben ser transparentes. También deben publicarse incidentes, interrupciones y medidas correctivas. La confidencialidad comercial no puede ocultar impactos ni compromisos fiscales.

La participación social es necesaria cuando los proyectos modifican fuentes, descargas o destinos del agua. Las comunidades y usuarios deben conocer beneficios, riesgos y mecanismos de monitoreo. La circularidad no puede legitimar transferencias hídricas injustas.

A partir del análisis realizado, se propone un modelo de economía circular del agua para Guanajuato, compuesto por siete componentes interrelacionados: balance y prevención; separación de corrientes; recirculación interna; reutilización externa; recuperación de recursos; simbiosis productiva; gobernanza y verificación.

El modelo opera en tres escalas. En la empresa se reducen consumos, se separan corrientes y se recuperan recursos. En el parque o la cadena se comparten infraestructura, información y servicios. En la escala territorial se verifica la reducción de presión sobre cuencas y acuíferos.

Los indicadores deben incluir extracción total, intensidad hídrica, consumo consuntivo, porcentaje y volumen de reúso, agua convencional sustituida, energía requerida, contaminantes removidos, materiales recuperados, costos, incidentes y evolución de la fuente.

La evaluación debe abarcar varios años. Una instalación puede operar adecuadamente al inicio y deteriorarse después por falta de mantenimiento, mientras que el consumo puede aumentar con la expansión productiva. La verificación continua permite detectar estos cambios.

Conclusiones

Guanajuato enfrenta el desafío de mantener una economía agrícola, agroindustrial y manufacturera activa en un territorio donde la mayoría de los acuíferos presenta disponibilidad negativa. El modelo productivo debe transitar de la expansión de la extracción hacia la reducción de la demanda y el mantenimiento del agua en circulación.

La circularidad no debe limitarse al tratamiento al final de la tubería ni a divulgar porcentajes de reúso. Comienza con prevención, medición, separación de corrientes y reingeniería de procesos. Después pueden incorporarse recirculación, intercambio y recuperación. La agroindustria y la manufactura ofrecen oportunidades diferentes. Los efluentes agroindustria-

les pueden aportar agua, materia orgánica, nutrientes y energía; las corrientes manufactureras pueden permitir recuperar agua, calor, metales y productos químicos. Cada alternativa requiere caracterización y tratamiento específicos.

La gestión debe extenderse hacia las materias primas y los proveedores, pues las plantas de ensamble o procesamiento no concentran todo el impacto. La estandarización, el financiamiento y la infraestructura compartida pueden acelerar la transición cuando las empresas tractoras apoyan a las unidades de menor tamaño.

En la curtiduría son indispensables la separación de corrientes, la recuperación de cromo, el control de sales y sulfuros y la gestión segura de lodos. El reúso solo es sostenible cuando no traslada contaminantes hacia suelos, otras industrias o cuerpos receptores.

La simbiosis industrial puede reducir costos y aprovechar economías de escala en parques y corredores. Requiere demanda estable, contratos, estándares de calidad, mecanismos de contingencia y una entidad coordinadora con capacidad técnica.

La colaboración público-privada puede impulsar redes de agua regenerada y plantas compartidas. Su propósito no debe ser proporcionar agua barata a unas cuantas empresas, sino sustituir extracciones, mejorar el saneamiento y generar beneficios territoriales verificables.

La circularidad debe prevenir efectos rebote. Una mejora por unidad producida no genera ahorro cuando aumenta la extracción total. Los proyectos deben establecer límites, cuantificar la sustitución y definir el destino de los volúmenes recuperados.

El modelo articula la empresa, el parque industrial o la cadena productiva y la cuenca o el acuífero. Esta integración permite distinguir la eficiencia interna de la sostenibilidad territorial y evita que los beneficios privados oculten impactos acumulativos.

La transición hacia una economía circular del agua en Guanajuato dependerá de información pública, financiamiento, tecnología apropiada, coordinación institucional y participación social. El éxito no se medirá por el volumen que circula dentro de las empresas, sino por la reducción efectiva de la presión sobre las fuentes, la mejora ambiental, la competitividad y la seguridad hídrica.

Referencias

- Abdulla, H., Zamorano, M., Rodríguez, M. L., El Shahawy, A., Hosny, S., y El-Shatoury, S. (2023). An overview of agro-food industry wastewater treatment: A bibliometric analysis and literature review. *Applied Water Science*, 13, 47. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01857-3>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Disponibilidad media anual de agua subterránea en los acuíferos del estado de Guanajuato. Gobierno de México.
- Crovella, T., Paiano, A., Falciglia, P. P., Lagioia, G., y Ingrao, C. (2024). Wastewater recovery for sustainable agricultural systems in the circular economy: A systematic literature review of life cycle assessments. *Science of the Total Environment*, 912, 169310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169310>
- Delgado, A., Rodriguez, D. J., Amadei, C. A., y Makino, M. (2024). Water in Circular Economy and Resilience framework. *Utilities Policy*, 87, 101604. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101604>
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Georgiou, I., Caucci, S., Morris, J. C., Guenther, E., y Krebs, P. (2023). Assessing the potential of water reuse uptake through a private-public partnership: A practitioner's perspective. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 199-220. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00166-w>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2022, 26 de octubre). Inauguran XXX edición del Encuentro Nacional de Curtidores.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2024). Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato Visión 2050.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2025). Estrategia Hídrica para Guanajuato Visión 2050.
- Kumar, R., Basu, A., Bishayee, B., Chatterjee, R. P., Behera, M., Ang, W. L., Pal, P., Shah, M., Tripathy, S. K., Ambika, S., Janani, V. A., Chakraborty, S., Nayak, J., y Jeon, B.-H. (2023). Management of tannery waste effluents towards the reclamation of clean water using an integrated membrane system: A state-of-the-art review. *Environmental Research*, 229, 115881. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115881>
- Loza Hernandez, L., y Arroyo, P. (2023). Acciones para fomentar la economía circular: Estudio de caso de manufactureras multinacionales en los sectores automotriz y de bienes de consumo rápido en México. *Acta Universitaria*, 33, 1-20. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3798>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Ramin, E., Faria, L., Gargalo, C. L., Ramin, P., Flores-Alsina, X., Andersen, M. M., y Germaey, K. V. (2024). Water innovation in industrial symbiosis: A global review. *Journal*

- of Environmental Management*, 349, 119578. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119578>
- Rentería Núñez, G., y Perez-Castillo, D. (2023). Business models for industrial symbiosis: A literature review. *Sustainability*, 15(12), 9142. <https://doi.org/10.3390/su15129142>
- Sandoval Cabrera, S. V., Sánchez Gálvez, M. D., y López Vergara, A. C. (2024). El consumo de agua en la cadena de suministro de la industria automotriz: El caso de Guanajuato, México. *Intersticios Sociales*, (28), 179-207. <https://doi.org/10.55555/IS.28.578>
- Silva, J. A. (2023). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>

6. Querétaro: reúso de agua y alianzas público-privadas para el desarrollo industrial*

EUGENE HAKIZIMANA**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.06>

Resumen

Querétaro posee una economía industrial diversificada, pero su desarrollo ocurre en un territorio donde varios acuíferos presentan balances negativos y los usos urbanos, agrícolas e industriales compiten por el recurso. El objetivo del capítulo es analizar, mediante una investigación teórica y documental, las condiciones para impulsar el reúso industrial de aguas residuales tratadas mediante alianzas público-privadas. La revisión integra economía circular, tratamiento avanzado, gestión de riesgos, gobernanza contractual y aceptación social. Los resultados muestran que la viabilidad depende de la distancia entre plantas y usuarios, la correspondencia entre calidad y uso, la estabilidad del suministro, las tarifas, la medición del agua convencional sustituida y la asignación de responsabilidades. Se propone un modelo basado en planeación territorial, infraestructura dual, barreras múltiples, contratos de desempeño, transparencia y reducción verificable de extracciones. Se concluye que el reúso puede contribuir al desarrollo industrial de Querétaro cuando sustituye fuentes sobreexplotadas, protege el derecho humano al agua y se complementa con eficiencia, saneamiento y conservación de acuíferos.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Económicas. Profesor-investigador en la Escuela Superior de Comercio y Administración (unidad Santo Tomás), Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1804-1516>; Scopus ID: 57192373996; correo electrónico: eha-kizimana@ipn.mx

Palabras clave: *reúso de agua, desarrollo industrial, agua regenerada, alianzas público-privadas.*

Introducción

Querétaro se ha consolidado como uno de los principales polos industriales del centro de México. Su estructura productiva comprende actividades automotrices, aeroespaciales, metalúrgicas, alimentarias, químicas, electrónicas, logísticas y de tecnologías de la información. Además, cuenta con una red de clústeres que vincula empresas, universidades, centros de investigación y autoridades. Esta concentración impulsa inversión, empleo e innovación, pero también incrementa la demanda de suelo, energía, infraestructura y agua (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025; Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro [SEDESU], s. f.).

El agua participa en numerosos procesos industriales, aunque su función varía entre sectores e instalaciones. Se utiliza en enfriamiento, generación de vapor, limpieza de equipos y superficies, preparación de materiales, tratamiento de piezas, producción de alimentos, control de emisiones, mantenimiento y servicios sanitarios. Incluso las actividades con menor consumo directo pueden depender de proveedores o servicios intensivos en agua, por lo que su continuidad está condicionada por la disponibilidad regional (Georgiou et al., 2023; Silva, 2023a).

El crecimiento industrial ocurre en un contexto de presión sobre las aguas subterráneas. La Comisión Nacional del Agua reporta disponibilidad media anual negativa en los acuíferos Valle de Querétaro, Valle de Amazcala, Valle de San Juan del Río, Valle de Buenavista y Valle de Huimilpan. Los mayores déficits corresponden a Valle de Querétaro, con aproximadamente 65.56 hectómetros cúbicos anuales, y Valle de San Juan del Río, con 56.89 (Comisión Nacional del Agua [Conagua], s. f.).

Un balance negativo no significa que el acuífero esté vacío, sino que la recarga media anual, una vez descontada la descarga natural comprometida, resulta inferior al volumen concesionado o extraído. En términos prácticos, ampliar las concesiones agrava el deterioro o compromete otros usos, por

lo que el crecimiento debe apoyarse en reducción, sustitución y gestión de la demanda (Conagua, s. f.).

El crecimiento poblacional, la expansión urbana, la agricultura, la ganadería y la industria ejercen presión conjunta sobre las fuentes subterráneas. Ningún sector explica por sí solo el abatimiento. No obstante, las empresas industriales poseen capacidades técnicas, financieras y organizativas para acelerar la eficiencia y adoptar fuentes alternativas. También pueden ofrecer una demanda estable que favorezca la viabilidad de las plantas de tratamiento y las redes de agua regenerada (Georgiou et al., 2023).

Un crecimiento industrial basado en mayores extracciones subterráneas encontrará límites físicos e institucionales. Perforar pozos o profundizar los existentes puede ampliar temporalmente el suministro de una instalación, pero eleva los costos de bombeo, intensifica los conflictos y agrava el abatimiento. La seguridad hídrica empresarial depende no solo de la existencia formal de una concesión, sino de la disponibilidad real y sostenida del acuífero (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Silva, 2023b).

El tratamiento y reúso de aguas residuales ofrecen una vía para disminuir la dependencia del agua potable y subterránea. El reúso consiste en emplear deliberadamente un efluente tratado que cumple los requisitos del nuevo uso. Puede destinarse a enfriamiento, servicios sanitarios, riego de áreas verdes, control de polvo y lavados preliminares; con tratamientos adicionales, también puede alimentar calderas o ciertos procesos industriales (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Mejía-Marchena et al., 2023).

La Comisión Estatal de Aguas de Querétaro reconoce usos del agua tratada en procesos industriales, agricultura de tallo alto y algunas actividades recreativas sin contacto directo. Esto confirma que el reúso forma parte del sistema estatal de gestión hídrica y no constituye únicamente una posibilidad tecnológica (Comisión Estatal de Aguas de Querétaro [CEA Querétaro], s. f.).

El reúso puede beneficiar al organismo operador y a las empresas. El primero obtiene ingresos para sostener el tratamiento y las segundas acceden a una fuente más confiable y reducen su exposición a restricciones. El beneficio territorial, sin embargo, depende de sustituir de manera verificable agua convencional y disminuir las descargas contaminantes (Georgiou et al., 2023).

La disponibilidad de aguas residuales no garantiza su aprovechamiento. El efluente puede no cumplir los requisitos industriales; las plantas y usuarios pueden estar distantes; la conducción puede requerir bombeo; y el suministro depende del caudal recibido y del desempeño de la instalación. También deben gestionarse patógenos, sales, corrosión, incrustaciones y contaminantes emergentes (Ho et al., 2024; Kato y Kansha, 2024; Khan et al., 2024).

La infraestructura puede superar la capacidad financiera de un organismo público o de una empresa individual. Además del tratamiento secundario, algunos usos requieren filtración, eliminación de nutrientes, desinfección, membranas, oxidación avanzada, almacenamiento y redes separadas. La colaboración permite distribuir aportaciones y responsabilidades entre gobiernos, organismos operadores, empresas usuarias, desarrolladores de parques y operadores especializados (Georgiou et al., 2023; Ma et al., 2023).

San Juan del Río constituye un antecedente relevante. El Fondo Nacional de Infraestructura registró un proyecto para rehabilitar y ampliar en 300 litros por segundo la planta municipal de tratamiento, con el objetivo de alcanzar una capacidad total de 600 litros por segundo y reducir las descargas sin tratar al río San Juan. El esquema contempló recursos públicos y privados mediante una asociación público-privada. La última situación publicada corresponde a mayo de 2021, por lo que el proyecto se utiliza como antecedente de planeación y no como prueba de operación actual (Fondo Nacional de Infraestructura [Fonadin], 2021).

El antecedente muestra que saneamiento, ampliación de capacidad y financiamiento privado pueden integrarse en un mismo proyecto. Sin embargo, una planta diseñada para cumplir límites de descarga no produce automáticamente agua apta para todos los usos industriales. El reúso requiere incorporar desde la planeación a los usuarios, la conducción, la confiabilidad y el tratamiento adicional.

El objetivo es evaluar las condiciones tecnológicas, económicas, contractuales e institucionales necesarias para implementar alianzas público-privadas de reúso industrial en Querétaro. La pregunta de investigación es la siguiente: ¿qué elementos debe contener un modelo de colaboración para que el agua regenerada contribuya al desarrollo industrial sin trasladar riesgos excesivos al Estado, los usuarios domésticos o los ecosistemas?

La contribución del reúso no debe medirse solo por el volumen producido o distribuido. Depende del agua convencional efectivamente sustituida, la confiabilidad y calidad del suministro, los costos y los efectos sobre el sistema hídrico. Un proyecto que incorpora una nueva fuente sin reducir extracciones amplía la oferta privada, pero no genera un beneficio neto para las fuentes naturales.

Aproximación teórica y conceptual

El reúso forma parte de la economía circular porque mantiene el agua en uso durante más tiempo y reduce la extracción de fuentes convencionales. Frente al modelo lineal de captación, uso, tratamiento y descarga, la circularidad integra prevención, recirculación interna, recuperación y aprovechamiento externo de efluentes (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

La reducción de la demanda debe ocupar el primer lugar de la jerarquía. Una empresa no debe utilizar agua regenerada para sostener procesos ineficientes. La estrategia comienza con medición, reparación de fugas, optimización de limpiezas, recuperación de condensados, manejo de torres de enfriamiento y recirculación. Después de aplicar medidas razonables de eficiencia, el reúso externo puede sustituir parte del abastecimiento convencional (Silva, 2023a).

La recirculación mantiene el agua tratada dentro de la misma instalación o proceso. El reúso externo ocurre cuando una empresa utiliza efluentes tratados generados por otro usuario, generalmente un sistema municipal o una instalación cercana. Esta segunda modalidad requiere mayor coordinación contractual y regulatoria (Georgiou et al., 2023).

El agua regenerada es un efluente sometido a tratamiento para un uso posterior. Esto no significa que resulte apta para cualquier aplicación. La calidad debe relacionarse con el proceso receptor, la exposición de los trabajadores, el posible contacto con productos y los impactos ambientales (Ho et al., 2024).

El principio de calidad adecuada para el uso busca evitar el subtratamiento y el sobretratamiento. El primero genera riesgos sanitarios, daños a equipos o presencia de contaminantes; el segundo incrementa innecesariamente la

energía y los reactivos. La tecnología debe seleccionarse según los parámetros que condicionan la aplicación (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Kato y Kansha, 2024).

Los usos industriales pueden agruparse según sus exigencias. El riego de áreas verdes, el control de polvo y ciertos servicios sanitarios requieren menor calidad que las calderas, el lavado de productos o la fabricación. Las torres de enfriamiento ocupan una posición intermedia y exigen controlar metales, dureza, sólidos, sílice, cloruros, materia orgánica y microorganismos para prevenir incrustaciones, corrosión y crecimiento biológico (Georgiou et al., 2023).

La selección del tratamiento depende de la calidad del afluente y del uso final. Puede combinar cribado, sedimentación, procesos biológicos, coagulación-floculación, filtración, carbón activado, desinfección, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y oxidación avanzada. Como ninguna tecnología elimina todos los contaminantes, normalmente se requieren trenes de tratamiento (Kato y Kansha, 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

Los procesos biológicos reducen materia orgánica biodegradable y algunos nutrientes; los fisicoquímicos separan sólidos, aceites, metales y otros compuestos. Las membranas producen efluentes de alta calidad, pero presentan ensuciamiento, consumo energético y generación de concentrados que deben gestionarse (Kato y Kansha, 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

El enfoque de barreras múltiples combina prevención en la fuente, tratamiento, desinfección, almacenamiento, distribución, monitoreo y control del uso. La integración de varias barreras permite alcanzar una calidad adecuada para la mayoría de los usos no potables y reduce el efecto de una falla aislada en el sistema (Ho et al., 2024).

La confiabilidad es tan importante como la calidad promedio. Una planta puede producir regularmente un efluente adecuado y experimentar episodios de deterioro por cambios en el afluente, fallas de aireación, cortes de energía o problemas de desinfección. Los contratos deben definir parámetros, frecuencia de monitoreo, alarmas y acciones cuando no se cumplan las especificaciones (Ho et al., 2024).

Los contaminantes emergentes representan otro desafío. Los efluentes municipales pueden contener residuos farmacéuticos, productos de cuidado personal, sustancias industriales, microorganismos resistentes y com-

puestos no incluidos en la regulación convencional. El riesgo depende del uso, la concentración, la exposición y la capacidad de remoción del tratamiento (Khan et al., 2024).

Los usos industriales sin contacto con alimentos o personas suelen presentar menor riesgo que el reúso potable o agrícola, pero debe analizarse el destino posterior del agua. Una corriente puede recircularse, descargarse o incorporarse a lodos y emisiones. La evaluación debe abarcar todo el ciclo y evitar la transferencia de contaminantes (Khan et al., 2024).

En México, el marco regulatorio distingue descarga y reúso. La NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites para descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación, pero su cumplimiento no demuestra que el agua sea apta para cualquier proceso industrial. El proveedor y el usuario deben establecer requisitos adicionales según el riesgo y las especificaciones técnicas (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

También existen disposiciones federales, estatales y municipales para descargas al alcantarillado y usos específicos. La CEA Querétaro regula descargas de usuarios no domésticos y cuenta con normas técnicas para infraestructura de agua potable, agua tratada, alcantarillado sanitario y drenaje pluvial. Esta diversidad exige coordinación para evitar vacíos y duplicidades (CEA Querétaro, s. f.).

La infraestructura dual mantiene redes separadas para agua potable y regenerada. Esta separación reduce el riesgo de conexiones cruzadas y permite suministrar calidades distintas. Resulta más sencilla en nuevos parques industriales; en zonas consolidadas, instalar tuberías implica mayores costos y afectaciones urbanas (Georgiou et al., 2023).

La distancia entre la planta y los usuarios es decisiva. Una fuente abundante puede resultar económicamente inviable si requiere tuberías extensas o bombeo elevado. El costo depende de proximidad, diferencias de nivel, servidumbres de paso y concentración de la demanda (Georgiou et al., 2023).

Los parques industriales ofrecen ventajas al concentrar usuarios y permitir compartir almacenamiento, bombeo, tratamiento y monitoreo. La diversidad de procesos, sin embargo, implica requisitos de calidad diferentes. El sistema puede suministrar una calidad base y tratamientos adicionales en la planta central o en cada instalación.

La infraestructura requiere una demanda industrial estable. Las plantas municipales generan caudales relativamente continuos, mientras que el consumo empresarial varía por turnos, ciclos y condiciones económicas. Los contratos deben usar estimaciones realistas, volúmenes mínimos, capacidades máximas y reglas para reducciones temporales (Georgiou et al., 2023).

Las alianzas público-privadas son relaciones contractuales de largo plazo en las que actores públicos y privados distribuyen recursos, funciones y riesgos para proveer infraestructura o servicios. Pueden abarcar diseño, financiamiento, construcción, ampliación, operación, mantenimiento y tratamiento adicional (Ma et al., 2023).

En un proyecto de reúso, el organismo público puede aportar el efluente, la infraestructura existente y la autoridad para prestar el servicio; el operador privado, capital, tecnología y experiencia; las industrias, demanda; y los gobiernos, regulación, supervisión, derechos de vía o aportaciones públicas cuando se justifiquen (Georgiou et al., 2023).

Una alianza no equivale necesariamente a privatización. La propiedad y la responsabilidad última sobre el recurso y la infraestructura pueden permanecer públicas, mientras el contrato encarga actividades específicas a una empresa. La distinción depende de propiedad, plazo, riesgos, mecanismo de pago y facultades conservadas por la autoridad.

La alianza debe justificarse por el valor público y no solo por la falta de financiamiento. El proyecto debe mejorar el saneamiento, sustituir extracciones, reducir impactos, mantener tarifas razonables y asignar riesgos eficientemente. La inversión se recuperará mediante tarifas, contratos de compra, pagos públicos o una combinación de estos mecanismos (Ma et al., 2023).

La legislación de Querétaro en materia de alianzas público-privadas proporciona el marco para proyectos de servicios e infraestructura con participación privada. Exige planeación, autorización, contratación y supervisión, pero no determina por sí misma si un proyecto es conveniente; esa decisión requiere evaluación técnica, financiera, ambiental y social (Legislatura del Estado de Querétaro, 2024).

Los riesgos deben asignarse a la parte con mayor capacidad para controlarlos. El operador privado puede asumir diseño, construcción, integración tecnológica, operación y mantenimiento. La regulación, planeación y

protección del interés público permanecen en el Estado, mientras que demanda, energía, calidad del afluente y cambios regulatorios pueden requerir mecanismos compartidos.

La calidad del afluente es especialmente relevante. Una planta municipal recibe descargas domésticas, comerciales e industriales cuya composición puede variar. La entrada de sustancias tóxicas o inhibitorias afecta el tratamiento. El organismo público debe regular, medir y rastrear las descargas a la red y contar con capacidad de respuesta (Kato y Kansha, 2024).

El riesgo de demanda aparece cuando las industrias consumen menos agua de la prevista. Obligar al sector público a pagar toda la capacidad genera una carga fiscal, mientras que transferir toda la incertidumbre al operador eleva el precio. Los contratos pueden combinar pagos por disponibilidad, tarifas volumétricas y compromisos mínimos de los usuarios.

El riesgo de precio surge de la competencia entre agua regenerada y fuentes convencionales. Cuando el agua subterránea o potable es más barata porque no incorpora sus costos ambientales, las empresas tienen pocos incentivos para cambiar. Las tarifas y los límites de extracción influyen directamente en la viabilidad del reúso (Georgiou et al., 2023).

La aceptación social también condiciona los proyectos. Aunque el reúso industrial no potable suele generar menos rechazo que el potable, persisten preocupaciones sobre calidad, destino del agua y trato preferencial a empresas. Debe explicarse qué agua se utilizará, en qué procesos, con qué controles y qué beneficios producirá para el territorio (Moesker et al., 2024).

La participación no debe reducirse a persuadir al público. La innovación responsable exige incorporar preocupaciones sociales durante el diseño, mantener alternativas abiertas y permitir que las observaciones modifiquen el proyecto. La aceptación de largo plazo depende de confianza institucional y transparencia, no solo de campañas informativas (Moesker et al., 2024).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental de naturaleza cualitativa e integradora. El diseño permitió relacionar

disponibilidad hídrica, tratamiento de aguas residuales, reúso industrial, economía circular, gestión de riesgos y alianzas público-privadas.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos oficiales sobre acuíferos, legislación, normas ambientales, datos económicos y fichas de proyectos de infraestructura. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2025 y se incorporaron documentos anteriores cuando fueron necesarios para describir el contexto o el marco jurídico.

Los términos de búsqueda, en español e inglés, se relacionaron con reúso industrial, agua regenerada, tratamiento avanzado, riesgos sanitarios, acuíferos de Querétaro, alianzas público-privadas, infraestructura dual, plantas de tratamiento y parques industriales.

Los documentos se seleccionaron por su pertinencia, autoría académica u oficial, actualidad y claridad metodológica. Se excluyeron materiales promocionales sin evidencia verificable y textos que presentaban el reúso como una solución universal sin analizar calidad, costos, riesgos y alternativas.

El análisis se organizó en siete categorías: presión hídrica territorial; calidad adecuada para el uso; infraestructura y proximidad; viabilidad económica; distribución contractual de riesgos; gobernanza y aceptación; y adicionalidad hídrica. Estas categorías se integraron en una propuesta aplicable al desarrollo industrial de Querétaro.

El proyecto de ampliación de la planta de San Juan del Río se utilizó como antecedente documental de colaboración público-privada. No se evaluó su desempeño, porque la última información de Fonadin corresponde a la preparación contractual en 2021 y no permite afirmar que haya sido adjudicado ni conocer su condición operativa.

Los resultados son teóricos y no constituyen una evaluación de una planta o empresa específica. La falta de información pública homogénea sobre consumo industrial, producción y calidad de agua tratada, precios y contratos limita el cálculo del potencial estatal y constituye uno de los retos de gobernanza identificados.

Resultados

El primer resultado es que el reúso industrial debe planearse a escala territorial. La capacidad nominal de las plantas no basta. Debe relacionarse el volumen efectivamente tratado con la ubicación de los parques, la demanda, la calidad, las elevaciones, las servidumbres y la infraestructura disponible.

La planeación debe inventariar plantas municipales e industriales, caudales promedio, variaciones estacionales, calidad del efluente, capacidad ociosa y necesidades de rehabilitación. También requiere identificar usuarios potenciales, consumos, procesos, distancias, derechos de vía y fuentes convencionales que serían sustituidas.

La prioridad debe asignarse a corredores que combinen una fuente confiable de efluente, concentración industrial y acuíferos deficitarios. En estas condiciones, la infraestructura compartida puede producir reducciones cuantificables de extracción.

Los acuíferos del Valle de Querétaro y Valle de San Juan del Río requieren atención especial debido a sus balances negativos y a la concentración urbana e industrial. En ambos casos, el reúso puede complementar otras medidas, pero no sustituye la reducción de fugas, la gestión de la demanda, la planeación urbana y la protección de las áreas de recarga (Conagua, s. f.).

El segundo resultado es la necesidad de aplicar una jerarquía de gestión. Antes de recibir agua regenerada, las empresas deben reducir desperdicios. Las auditorías y metas de eficiencia pueden convertirse en requisitos para contratar suministro público o acceder a tarifas preferenciales.

La auditoría debe identificar fuentes, procesos, pérdidas, recirculación, evaporación, agua incorporada al producto y descargas. También debe distinguir usos que requieren calidad potable de aquellos compatibles con agua regenerada, lo que evita tratamientos innecesariamente intensivos.

La medición por proceso es indispensable. El consumo total de una planta puede ocultar ineficiencias o cambios de producción. Los indicadores deben incluir metros cúbicos por unidad producida, extracción absoluta, porcentaje y volumen de reúso, agua convencional sustituida y calidad de efluentes y residuos.

Una reducción relativa no siempre genera un beneficio territorial. La intensidad puede disminuir mientras la extracción total aumenta con la producción. Las metas deben combinar indicadores relativos con límites absolutos relacionados con la condición del acuífero.

El tercer resultado es que el reúso debe comenzar en aplicaciones de bajo riesgo y alta demanda, como torres de enfriamiento, servicios sanitarios, control de polvo, lavado de patios y riego de áreas verdes, siempre que se controlen los parámetros pertinentes.

Las torres de enfriamiento ofrecen una demanda relativamente constante, pero el agua regenerada puede aumentar corrosión, incrustaciones y crecimiento microbiológico. Deben controlarse sólidos, dureza, alcalinidad, cloruros, sílice, nutrientes y materia orgánica, además de gestionar biocidas y purgas (Georgiou et al., 2023).

Las calderas requieren mayor calidad y pueden necesitar membranas, intercambio iónico y desgasificación, porque las sales y la sílice generan depósitos y daños. La viabilidad depende de la presión de operación, la calidad del efluente y el costo energético.

Los procesos con contacto con alimentos, productos farmacéuticos o componentes de alta precisión requieren evaluaciones más rigurosas. Un efluente apto para enfriamiento no debe considerarse automáticamente adecuado para lavado o como ingrediente. Cada aplicación necesita especificaciones y controles propios (Kato y Kansha, 2024).

El cuarto resultado es que la calidad debe gestionarse mediante varias barreras. El tratamiento municipal constituye la primera; puede complementarse con filtración, desinfección avanzada y tratamiento en la planta usuaria. El sistema debe definir quién opera y valida cada etapa.

La turbidez, conductividad, pH, cloro residual y otros parámetros pueden medirse en línea, mientras que determinadas sustancias requieren análisis de laboratorio. La combinación de monitoreo continuo y muestreo periódico permite detectar cambios y confirmar el cumplimiento.

Los contratos deben establecer niveles de alerta y respuesta. Cuando un parámetro se aproxima al límite deben ajustarse los procesos; si se supera, el suministro debe desviarse o suspenderse. Las industrias necesitan capacidad de respaldo para evitar interrupciones graves.

La fuente de respaldo debe reservarse para contingencias y no utilizarse para mantener permanentemente las captaciones originales. Los volúmenes de respaldo deben registrarse y analizarse para identificar fallas recurrentes.

El quinto resultado es la necesidad de infraestructura separada. Las redes de agua regenerada deben identificarse, señalizarse y mantenerse físicamente separadas de las redes potables. Estas características resultan más fáciles y menos costosas cuando se incorporan desde el diseño de nuevas áreas industriales.

Los parques existentes requieren estudios de viabilidad. La extensión, las diferencias de elevación y las servidumbres pueden encarecer las tuberías. En algunos casos, el tratamiento interno puede resultar más conveniente.

Los camiones cisterna implican costos, emisiones, riesgos y dificultades de trazabilidad. Pueden utilizarse en pilotos o consumos pequeños, pero no constituyen una solución eficiente para demandas industriales de gran escala.

El almacenamiento ayuda a equilibrar diferencias entre producción y consumo. Las plantas generan caudal durante todo el día y las industrias concentran su demanda en turnos. El dimensionamiento debe considerar variaciones, mantenimiento y conservación de la calidad.

El sexto resultado es que la viabilidad depende de una demanda contractual suficiente. Antes de construir una red deben identificarse usuarios ancla dispuestos a contratar agua durante varios años. Los proyectos de gran escala suelen apoyarse en plantas de gran consumo o grupos de empresas.

Los contratos reducen la exposición financiera, pero no deben concentrar el riesgo en un solo usuario. La producción puede cambiar y una planta puede cerrar. La demanda debe distribuirse entre varios participantes y contemplar escenarios de crecimiento o reducción.

Los costos de conexión y tratamiento pueden ser demasiado altos para pequeñas y medianas empresas. La infraestructura compartida puede financiarse mediante parques, empresas ancla o fondos públicos, con aportaciones distribuidas según volumen, calidad requerida y capacidad de pago.

El séptimo resultado es que la tarifa del agua tratada debe ser competitiva sin situarse por debajo de su costo. Debe cubrir tratamiento, conducción, energía, almacenamiento, monitoreo, mantenimiento y reposición, y

reconocer el beneficio ambiental de sustituir agua subterránea y evitar descargas.

La comparación no debe limitarse a la tarifa actual del agua convencional. Deben incorporarse los costos de pozos, bombeo, tratamiento interno, restricciones futuras y deterioro de la fuente. Omitir estos costos puede impedir proyectos socialmente convenientes.

Los subsidios públicos pueden justificarse para infraestructura troncal con beneficios territoriales. No deben financiar equipos internos cuyo beneficio se concentra en una empresa con capacidad suficiente para invertir.

El octavo resultado es que la alianza debe asignar claramente los riesgos. El operador privado puede asumir diseño, construcción, tecnología, operación y mantenimiento. La planeación, regulación, supervisión y protección del derecho humano al agua deben permanecer bajo responsabilidad pública.

La responsabilidad por la calidad del afluente debe compartirse. El organismo público regula las descargas a la red; el operador diseña una planta resiliente a variaciones previsibles; y las industrias usuarias adaptan sus procesos a la calidad contratada.

Los pagos por disponibilidad y las tarifas volumétricas pueden equilibrar el riesgo de demanda. El operador recibe una remuneración por mantener la infraestructura disponible, pero parte de sus ingresos depende del volumen efectivamente entregado y aceptado.

El riesgo de desempeño debe vincularse con indicadores. Las fallas atribuibles al operador generan penalizaciones y los resultados superiores pueden compartir beneficios. Calidad, disponibilidad, energía, pérdidas, respuesta ante incidentes y satisfacción del usuario son variables pertinentes.

Los contratos deben regular las modificaciones. Durante su vigencia pueden cambiar demanda, regulación y tecnología. La flexibilidad debe equilibrarse con la protección de la competencia, y toda renegociación relevante debe justificarse, publicarse y conservar la asignación adecuada de riesgos.

El noveno resultado es que la transparencia contractual constituye una condición de legitimidad. Deben publicarse precio, plazo, garantías, mecanismos de pago, indicadores, penalizaciones y obligaciones fiscales. La confidencialidad puede proteger aspectos tecnológicos o comerciales, pero no compromisos públicos.

La autoridad contratante necesita capacidad técnica para supervisar. El operador suele disponer de mayor información sobre contratos complejos, lo que genera asimetrías. Se requieren equipos públicos especializados y auditorías independientes.

Las universidades y centros de investigación de Querétaro pueden apoyar caracterización, pruebas piloto, monitoreo, evaluación de materiales y verificación. Esta colaboración es congruente con la red de instituciones asociadas a los clústeres industriales.

La participación académica debe preservar su independencia. Los acuerdos deben definir financiamiento, acceso a datos y publicación de resultados, incluidos los fallos y efectos adversos.

El décimo resultado es que el agua regenerada debe sustituir extracciones existentes. Este principio de adicionalidad distingue entre ampliar la oferta y mejorar la seguridad hídrica. Antes de recibir el nuevo suministro, cada usuario debe establecer una línea base de agua convencional.

La sustitución puede verificarse mediante medidores, registros de pozos y facturación. Los contratos deben precisar qué volumen de extracción se reducirá y en qué plazo. Cuando existan concesiones, las empresas deben realizar los procedimientos legales correspondientes para ajustar los volúmenes.

Los ahorros no deben reasignarse automáticamente a una expansión productiva. La política estatal debe definir qué parte se destina a disminuir el déficit, atender necesidades urbanas o mantener reservas. Esta regla evita el efecto rebote.

La producción puede aumentar al mismo tiempo que disminuye el consumo absoluto de agua convencional, siempre que el volumen regenerado sustituya extracciones. La condición debe demostrarse con datos y no solo con porcentajes de reúso.

El undécimo resultado se relaciona con el antecedente de San Juan del Río. El proyecto integró rehabilitación y ampliación de una planta con financiamiento público y privado. La ficha de Fonadin registró una participación aproximada de 49 % del fondo y 51 % de inversión privada (Fonadin, 2021).

El objetivo principal fue reducir descargas sin tratar al río San Juan. Para incorporar reúso industrial sería necesario añadir análisis de demanda,

calidad, redes, tarifas y sustitución de extracciones. Saneamiento y reúso son complementarios, pero no equivalentes.

El antecedente también muestra la importancia del seguimiento público. Una ficha de preparación no permite conocer lo ocurrido después. Los proyectos de largo plazo deben publicar información continua sobre autorizaciones, adjudicación, construcción, operación y resultados.

El duodécimo resultado es que la aceptación social depende de la distribución de beneficios. En contextos de escasez, las comunidades pueden cuestionar razonablemente la inversión destinada a abastecer industrias. El proyecto debe demostrar que no reduce el agua potable disponible y que genera beneficios ambientales y económicos para el sistema.

El uso industrial de efluentes municipales no debe representar una transferencia del consumo humano al sector privado. Debe liberar agua de mayor calidad y generar ingresos que mejoren el saneamiento. Esta afirmación requiere balances verificables y contratos transparentes.

La comunicación debe aclarar que el reúso industrial no potable difiere del consumo humano directo. También debe reconocer incertidumbres y explicar los protocolos ante incidentes. Minimizar las preocupaciones aumenta la desconfianza.

La participación debe comenzar durante la planificación. Los usuarios domésticos, las comunidades, las industrias, los grupos de conservación y la academia pueden definir las prioridades, los criterios de evaluación y los mecanismos de monitoreo.

A partir de los resultados se propone un modelo de reúso industrial para Querétaro con ocho componentes: planeación territorial, eficiencia previa, calidad adecuada para el uso, infraestructura dual, demanda contractual, alianza con distribución de riesgos, adicionalidad hídrica y gobernanza transparente.

La planeación identifica plantas, usuarios y acuíferos prioritarios. La eficiencia evita utilizar agua regenerada para sostener desperdicios; la calidad adecuada reduce costos y riesgos; y la infraestructura dual asegura separación y trazabilidad.

La demanda contractual proporciona estabilidad financiera. Las responsabilidades se asignan según las capacidades de cada actor. La adicionalidad garantiza reducción de extracciones, mientras que la gobernanza transpa-

rente permite vigilar costos, calidad y resultados. El modelo opera en tres escalas. En la instalación se controlan procesos, calidad y consumo; en parques o corredores se comparten redes e infraestructura; y en el acuífero se verifica la reducción de la presión total.

Los indicadores deben incluir volumen tratado y suministrado, continuidad, calidad, energía por metro cúbico, pérdidas, tarifa, agua convencional sustituida, reducción de extracción, incidentes, usuarios conectados y evolución del acuífero.

La evaluación debe abarcar todo el ciclo contractual. Un proyecto puede cumplir al inicio y deteriorarse después por falta de mantenimiento, aumento de demanda o cambios en el afluente. El monitoreo continuo permite adaptar la operación y evitar la obsolescencia.

Conclusiones

Querétaro debe equilibrar su crecimiento industrial con una disponibilidad hídrica limitada. Los balances negativos de varios acuíferos muestran que la expansión no puede sostenerse mediante captaciones subterráneas adicionales.

Las industrias que no requieren agua potable pueden utilizar aguas residuales tratadas. El reúso puede disminuir la presión sobre los acuíferos, generar ingresos para el saneamiento y fortalecer la resiliencia empresarial.

Las aguas residuales no constituyen una solución automática. Los proyectos deben relacionar calidad y uso, proximidad, infraestructura, demanda estable, tarifas viables y capacidad de respuesta ante fallas.

La calidad debe gestionarse mediante barreras y contratos. Cumplir límites de descarga no significa que el efluente resulte apto para todos los procesos. Cada aplicación requiere análisis de riesgos y parámetros específicos.

Las alianzas público-privadas pueden aportar capital, tecnología y experiencia operativa. Su eficacia depende de competencia, transparencia, asignación adecuada de riesgos, indicadores de desempeño y supervisión pública.

La participación privada no sustituye la rectoría estatal. La planeación, regulación, monitoreo y protección del derecho humano al agua deben

permanecer bajo responsabilidad pública, junto con el control de las obligaciones fiscales y contractuales.

El antecedente de San Juan del Río muestra la posibilidad de combinar inversión pública y privada para ampliar el saneamiento. También evidencia la necesidad de publicar información permanente sobre el desarrollo y los resultados de los proyectos.

La tarifa del agua regenerada debe reflejar costos razonables y evitar subsidios injustificados a las empresas. El apoyo público puede dirigirse a infraestructura con beneficios colectivos, mientras las mejoras internas corresponden a los usuarios.

La adicionalidad hídrica es el criterio determinante. Un proyecto mejora la seguridad hídrica solo cuando reduce de manera comprobable las extracciones convencionales. Si el consumo total continúa aumentando, el reúso amplía la oferta, pero no resuelve la presión territorial.

La aceptación social depende de que el reúso beneficie al sistema y no solo a las empresas. Los proyectos deben mejorar el saneamiento, elevar la calidad de las descargas, proteger a los usuarios domésticos y disminuir la presión sobre las fuentes.

El modelo propuesto articula la empresa, el parque industrial y el acuífero mediante eficiencia, tratamiento adecuado, infraestructura dual, sustitución verificable, contratos y transparencia. Esta perspectiva vincula la competitividad empresarial con la sostenibilidad territorial.

El futuro de Querétaro como polo industrial dependerá de su capacidad para generar valor con menor consumo de agua convencional. El reúso puede desempeñar un papel central cuando forma parte de una política integrada de eficiencia, saneamiento, conservación y gestión del crecimiento.

Referencias

- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro. (s. f.). Preguntas frecuentes. <https://web-cea-qa.ceaqueretaro.gob.mx/preguntas-frecuentes/>
- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). Aguas subterráneas: Acuíferos del estado de Querétaro. Gobierno de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/queretaro/queretaro.html>
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Fondo Nacional de Infraestructura. (2021). Ampliación planta de tratamiento de aguas residuales San Juan del Río, Querétaro. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos. <https://www.fonadin.gob.mx/fni2/fp08/>
- Georgiou, I., Caucci, S., Morris, J. C., Guenther, E., y Krebs, P. (2023). Assessing the potential of water reuse uptake through a private–public partnership: A practitioner's perspective. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 199-220. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00166-w>
- Ho, J., Ahmadi, J., Schweikart, C., Hübner, U., Schwaller, C., Tiehm, A., y Drewes, J. E. (2024). Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. *Water Research*, 267, 122429. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122429>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Censos Económicos 2024: Resultados definitivos. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>
- Kato, S., y Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51064-51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Khan, U. A., Löffler, P., Spilsbury, F., Wiberg, K., Stålsby Lundborg, C., y Lai, F. Y. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136175. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136175>
- Legislatura del Estado de Querétaro. (2024). Ley de Asociaciones Público Privadas para el Estado de Querétaro. <https://site.legislaturaqueretaro.gob.mx/CloudPLQ/InvEst/Leyes/LEY-ID-004.pdf>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public–private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C.,

- Arismendy-Montes, L., y Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: Advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2198147>
- Moesker, K., Pesch, U., y Doorn, N. (2024). Public acceptance in direct potable water reuse: A call for incorporating responsible research and innovation. *Journal of Responsible Innovation*, 11(1), 2304382. <https://doi.org/10.1080/23299460.2024.2304382>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro. (s. f.). Red Estatal de Clústeres. Gobierno del Estado de Querétaro. <https://queretaro.gob.mx/web/sedesu/cluster>
- Silva, J. A. (2023a). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Silva, J. A. (2023b). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water*, 15(17), 3064. <https://doi.org/10.3390/w15173064>

7. Jalisco: gobernanza de cuenca y acción colectiva empresarial en torno al lago de Chapala*

EUGENE HAKIZIMANA **



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.07>

Resumen

El lago de Chapala es el cuerpo lacustre más extenso de México y una fuente estratégica de abastecimiento para el Área Metropolitana de Guadalajara. Su evolución depende de procesos hidrológicos, productivos e institucionales que abarcan la cuenca Lerma-Chapala y trascienden las fronteras de Jalisco. El objetivo del capítulo es analizar, mediante una investigación teórica y documental, cómo la acción colectiva empresarial puede contribuir a la gobernanza de la cuenca. La revisión integra aportes sobre recursos de uso común, gobernanza colaborativa, redes interorganizacionales, gestión responsable del agua y justicia hídrica. Los resultados indican que la eficiencia interna es necesaria, pero insuficiente para atender riesgos compartidos de disponibilidad, contaminación y deterioro ecosistémico. Se propone un modelo compuesto por diagnóstico compartido, responsabilidad individual, metas territorialmente pertinentes, coordinación multiactor, financiamiento transparente y monitoreo independiente. Se concluye que las empresas pueden aportar recursos, tecnología e innovación, pero deben rendir cuentas, respetar los derechos de las comunidades y producir beneficios netos verificables para la cuenca.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Económicas. Profesor-investigador en la Escuela Superior de Comercio y Administración (unidad Santo Tomás), Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1804-1516>; Scopus ID: 57192373996; correo electrónico: eha-kizimana@ipn.mx

Palabras clave: *acción colectiva empresarial, gobernanza de cuenca, lago de Chapala, gestión responsable del agua.*

Introducción

El lago de Chapala es el cuerpo lacustre más extenso de México y uno de los componentes hidrológicos, ecológicos y sociales más importantes del occidente del país. Su capacidad máxima se aproxima a 7 897 millones de metros cúbicos y su superficie alcanza alrededor de 114 659 hectáreas, distribuidas entre Jalisco y Michoacán. Además de sus funciones ecológicas, pesqueras, culturales, turísticas y paisajísticas, constituye la principal fuente de abastecimiento del Área Metropolitana de Guadalajara, a la que aporta aproximadamente 60 % del agua suministrada (Comisión Estatal del Agua de Jalisco [CEA Jalisco], s. f.).

La relevancia del lago no puede comprenderse únicamente desde sus límites inmediatos. Chapala se ubica en la cuenca Lerma-Chapala, que comprende territorios del Estado de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco. Más de 20 millones de personas habitan la cuenca, donde se concentran actividades agrícolas, ganaderas, industriales y urbanas. El agua que llega al lago depende de extracciones, presas, retornos agrícolas, descargas y usos urbanos situados a cientos de kilómetros (López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

Esta interdependencia convierte al lago en un receptor integrado de los impactos generados en toda la cuenca. Las decisiones aguas arriba modifican el volumen, el momento y la calidad de los escurrimientos que llegan a Chapala. A su vez, las extracciones destinadas a Guadalajara influyen en el balance del lago y en las actividades económicas y formas de vida de las comunidades ribereñas (López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

La variabilidad climática añade complejidad. Los periodos lluviosos elevan temporalmente los niveles y pueden ocultar presiones estructurales, mientras que las sequías reducen los escurrimientos, intensifican la competencia y evidencian deficiencias en infraestructura y asignación. La gobernanza debe gestionar tanto los excedentes de corto plazo como la escasez prolongada (Saikia y Jiménez, 2023).

El problema de Chapala no es únicamente cuantitativo. Las descargas municipales, industriales, agrícolas y difusas que llegan por los ríos de la cuenca condicionan la calidad. Los nutrientes favorecen la eutrofización, mientras que los metales y otros contaminantes generan riesgos ecosistémicos y aumentan las exigencias de potabilización (Alvarez-Bobadilla et al., 2023).

Los modelos de transporte de contaminantes muestran que los nutrientes y metales pueden desplazarse y afectar zonas alejadas de sus fuentes. Su comportamiento depende de factores hidráulicos, químicos y espaciales, por lo que el monitoreo puntual no basta para describir la evolución de la contaminación (Alvarez-Bobadilla et al., 2023).

En 2024, el Congreso del Estado de Jalisco solicitó fortalecer la supervisión de las descargas comerciales, industriales y municipales hacia los cauces que desembocan en el lago de Chapala. El exhorto reconoció que el problema requiere coordinación federal, estatal y municipal, inspección, monitoreo y sanciones. La responsabilidad voluntaria empresarial no puede sustituir la regulación del saneamiento (Congreso del Estado de Jalisco, 2024).

La relevancia empresarial de la cuenca se relaciona con la estructura productiva de Jalisco. El estado alberga cadenas agroalimentarias, de bebidas, electrónica, semiconductores, automotriz, farmacéutica, química, turística y energética. Estas actividades dependen del agua mediante procesos directos, proveedores, servicios urbanos y producción agropecuaria. La agenda estatal reconoce la colaboración entre gobierno, iniciativa privada, academia y sociedad civil como componente del desarrollo sostenible (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025; Gobierno del Estado de Jalisco, 2024).

El riesgo hídrico empresarial no se limita a recibir menos agua. Comprende el deterioro de la calidad, el aumento de los costos de tratamiento, las interrupciones, las restricciones regulatorias, los conflictos territoriales y los problemas con proveedores. Una empresa puede reducir su consumo interno y continuar expuesta cuando la cuenca permanece contaminada, sobreexplotada o institucionalmente fragmentada (Sojamo y Rudebeck, 2024).

La gestión responsable del agua parte de que las empresas deben conocer sus dependencias e impactos, mejorar su desempeño interno y participar de manera significativa en soluciones de cuenca. El enfoque amplía la responsabilidad corporativa desde el consumo dentro de la planta hacia la

calidad, los ecosistemas, las comunidades y las cadenas de suministro (Alliance for Water Stewardship, 2024; Sojamo y Rudebeck, 2024).

La participación empresarial en la gestión de cuencas también plantea riesgos. Las empresas pueden aportar financiamiento, tecnología, experiencia y capacidad de ejecución, pero sus recursos económicos e influencia política superan con frecuencia los de las comunidades y organizaciones sociales. Sin reglas claras, la colaboración puede privatizar decisiones, desplazar a los actores con menos recursos o utilizar proyectos ambientales como legitimación reputacional (Sojamo y Rudebeck, 2024; Williams et al., 2023).

Es necesario distinguir la responsabilidad individual de la acción colectiva. Mejorar procesos, tratar descargas y cumplir la normativa corresponde al desempeño propio de cada empresa. Existe acción colectiva cuando varias organizaciones coordinan recursos y decisiones con autoridades y actores sociales para atender un problema compartido que no podrían resolver de manera aislada (Alliance for Water Stewardship, 2024).

Existen precedentes institucionales de coordinación en la cuenca Lerma-Chapala. El Consejo de Cuenca Lerma-Chapala funciona como órgano de apoyo, consulta y participación de autoridades, usuarios y organizaciones sociales. La Conagua también ha promovido programas regionales y espacios de discusión sobre disponibilidad, prioridades y estrategias de gestión (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2022a).

La gestión integrada del lago requiere instituciones, políticas, participación, información, tecnología y financiamiento. La sostenibilidad no depende de un proyecto aislado, sino de reglas, conocimientos, recursos y capacidades sociales sostenidas en el tiempo (Congreso del Estado de Jalisco, 2022; López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

Este capítulo analiza los fundamentos, las posibilidades, los riesgos y los incentivos de la acción colectiva empresarial en torno al lago de Chapala. La pregunta guía es la siguiente: ¿cómo pueden las empresas contribuir a la gobernanza y sostenibilidad de la cuenca sin sustituir al Estado, privilegiar intereses particulares ni excluir a las comunidades que dependen del lago?

La premisa central es que la acción empresarial genera valor público cuando se sustenta en responsabilidades verificables, se alinea con las prioridades de la cuenca y fortalece las instituciones existentes. Las contribu-

ciones privadas no deben traducirse en ventajas para la asignación del agua, la adjudicación de contratos o la definición de normas.

Aproximación teórica y conceptual

Una cuenca hidrográfica es el territorio cuyos escurrimientos convergen hacia un cauce o cuerpo receptor. Como unidad de gestión permite relacionar fuentes, usuarios, ecosistemas, procesos productivos e impactos acumulativos. Sus límites naturales no coinciden necesariamente con fronteras municipales o estatales, lo que genera desafíos de coordinación intergubernamental y sectorial (López Gómez y Juárez Aguilar, 2024; Saikia y Jiménez, 2023).

La gobernanza de cuencas comprende las instituciones, reglas, actores, procesos y relaciones mediante los cuales se asigna y gestiona el agua y se protegen los ecosistemas asociados. Incluye rendición de cuentas, infraestructura, saneamiento, conservación, financiamiento, información y participación. La intervención de múltiples actores no elimina la rectoría estatal sobre regulación, supervisión y defensa del interés público (Saikia y Jiménez, 2023).

La gobernanza debe combinar capacidad de gestión y adaptación. Sus atributos incluyen transparencia, rendición de cuentas, participación, coordinación, equidad, conocimiento, aprendizaje, flexibilidad y respuesta ante la incertidumbre. La existencia formal de instituciones no garantiza resultados cuando carecen de recursos, información, legitimidad o autoridad para ejecutar sus decisiones (Saikia y Jiménez, 2023).

La naturaleza interjurisdiccional de la cuenca multiplica los centros de decisión. Participan la Conagua, los gobiernos estatales, los municipios, los organismos operadores, los distritos de riego, las asociaciones de usuarios, las empresas, las organizaciones civiles, las universidades y las comunidades. Cada actor dispone de competencias, recursos e información parciales que pueden producir vacíos, duplicidades y contradicciones (Conagua, 2022a; López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

La gobernanza policéntrica comprende múltiples centros de decisión relativamente autónomos e interdependientes. Puede favorecer soluciones

adaptadas y distribuir cargas, pero requiere coordinación vertical y horizontal para evitar que las decisiones de un actor generen externalidades en otras partes de la cuenca (Bawarshi Abarzúa y Glückler, 2023).

Las redes de gobernanza vinculan organizaciones que no dependen de una única autoridad. Su eficacia depende de la confianza, la legitimidad, el intercambio de información y la existencia de organizaciones capaces de conectar actores. Las redes densas movilizan recursos e innovación, pero pueden cerrarse cuando la influencia se concentra en pocos participantes (Bawarshi Abarzúa y Glückler, 2023).

Esta observación es relevante para la participación empresarial. Una multinacional, una comunidad ribereña, una cooperativa pesquera y un municipio pequeño no cuentan con capacidades económicas, técnicas y jurídicas equivalentes. La gobernanza debe reconocer esas diferencias y establecer salvaguardas para que la participación no reproduzca desigualdades (Williams et al., 2023).

La justicia hídrica permite evaluar la distribución de beneficios, cargas y poder de decisión. La dimensión distributiva pregunta quién recibe agua, infraestructura y recursos y quién soporta contaminación o restricciones; la procedimental, quién participa e influye; y la de reconocimiento, si se respetan las identidades, los conocimientos y las formas de vida de las comunidades (Williams et al., 2023).

La acción colectiva ocurre cuando actores interdependientes coordinan decisiones para resolver un dilema común. En la gestión del agua, los beneficios inmediatos de extraer o contaminar pueden concentrarse en un usuario, mientras los costos recaen sobre los ecosistemas y la sociedad. La cooperación requiere normas, información, confianza, incentivos, monitoreo y mecanismos para resolver conflictos (Bawarshi Abarzúa y Glückler, 2023).

La acción colectiva empresarial responde a riesgos operativos, financieros, regulatorios y reputacionales que no pueden controlarse únicamente dentro de una instalación. Una empresa eficiente puede seguir siendo vulnerable si opera en una cuenca deteriorada (Sojamo y Rudebeck, 2024).

La literatura distingue tres escalas de gestión empresarial: las operaciones directas, la cadena de valor y la cuenca. En la primera, la empresa controla el consumo, las pérdidas y las descargas; en la segunda, influye sobre proveedores y materias primas; y en la tercera, colabora con autoridades,

comunidades y otros usuarios para atender riesgos compartidos (Alliance for Water Stewardship, 2024; Sojamo y Rudebeck, 2024).

Estas escalas son complementarias. Una empresa con fugas, incumplimientos o descargas inadecuadas no puede sustituir sus obligaciones mediante el financiamiento de proyectos externos. La acción colectiva no elimina el deber individual de cumplir, prevenir y reducir impactos (Alliance for Water Stewardship, 2024).

El punto de partida es un balance hídrico y un diagnóstico territorial. La empresa debe conocer el origen, la extracción, el consumo consuntivo, la calidad, las descargas y la dependencia de proveedores, y relacionar esos datos con las condiciones de la cuenca y las necesidades de otros usuarios (Sojamo y Rudebeck, 2024).

Las metas empresariales deben responder al contexto. Un mismo porcentaje de reducción tiene significados distintos según la disponibilidad y calidad de la cuenca. Los objetivos deben relacionar el desempeño interno con umbrales y prioridades territoriales. El indicador principal no es solo el volumen ahorrado, sino el beneficio neto en la fuente (Alliance for Water Stewardship, 2024).

Los beneficios volumétricos permiten estimar resultados de eficiencia, restauración, recarga o acceso, pero no todos los metros cúbicos son equivalentes. El momento, la ubicación y la calidad modifican su valor. Un volumen recuperado en lluvias no equivale al disponible en sequía, y una intervención remota no compensa necesariamente un impacto local.

Los indicadores deben combinar cantidad, calidad, acceso, ecosistemas y gobernanza. Una compensación volumétrica no elimina por sí misma la contaminación ni las desigualdades de acceso. La gestión responsable debe abarcar varias dimensiones (Alliance for Water Stewardship, 2024; Sojamo y Rudebeck, 2024).

Las empresas pueden colaborar en distintos niveles: intercambio de información y coordinación; acciones conjuntas de monitoreo, restauración o tratamiento; y redes permanentes, fondos, infraestructura compartida y decisión conjunta. La profundidad del arreglo debe corresponder al problema, los riesgos y las capacidades disponibles (Alliance for Water Stewardship, 2024).

No siempre es necesario crear una nueva institución. La coordinación puede desarrollarse dentro del Consejo de Cuenca, mediante comisiones

existentes o grupos de trabajo. Crear plataformas sucesivas con reglas e indicadores distintos puede fragmentar esfuerzos. Antes de establecer un nuevo mecanismo debe identificarse qué función no pueden cumplir las instituciones actuales (Saikia y Jiménez, 2023).

La rectoría estatal permanece intacta. Las autoridades deben asignar, priorizar, autorizar, supervisar y sancionar; garantizar el derecho humano al agua; generar información pública; y proteger los ecosistemas. Las empresas pueden aportar recursos y conocimiento, pero no distribuir el agua, auditarse a sí mismas ni establecer unilateralmente los umbrales de progreso (Sojamo y Rudebeck, 2024).

Las jerarquías, los incentivos económicos y las redes pueden complementarse. La regulación establece obligaciones; los mecanismos económicos modifican incentivos; y las redes facilitan cooperación e innovación. La regulación sin coordinación puede ser insuficiente, mientras que la cooperación sin autoridad descansa en compromisos voluntarios débiles (Saikia y Jiménez, 2023).

La integridad es central. Una iniciativa puede ser técnicamente útil y perder legitimidad por conflictos de interés, opacidad o distribución inequitativa. Deben publicarse los intereses, las contribuciones y las decisiones, existir reglas de recusación y operar mecanismos independientes de queja.

Como criterio de gobernanza propuesto en este capítulo, las aportaciones financieras o en especie de las empresas no deberían traducirse en una mayor capacidad de decisión sobre la asignación del agua, en acceso preferente al recurso ni en facultades para bloquear medidas regulatorias.

En este capítulo, el lavado verde se entiende como una comunicación selectiva o exagerada de acciones ambientales que puede generar una percepción de desempeño responsable superior al efectivamente demostrado, especialmente cuando no se transparentan impactos materiales de la propia organización. En materia hídrica, un proyecto comunitario o una donación no compensan automáticamente extracciones o descargas que continúan generando impactos (Sojamo y Rudebeck, 2024).

El nexo agua-energía-alimentos-ecosistemas amplía el análisis. En el caso del lago de Chapala, este enfoque implica evaluar de manera conjunta las relaciones entre el abastecimiento urbano, las actividades agrícolas e

industriales, las pesquerías, el turismo y las funciones ecológicas del lago. Una medida de ahorro o reasignación de agua debe considerar sus efectos sobre la producción agroalimentaria y los retornos a la cuenca; las alternativas de bombeo, tratamiento o reúso deben considerar sus requerimientos energéticos; y las modificaciones de extracción o descarga deben evaluar sus posibles efectos sobre la biodiversidad, las pesquerías y la calidad del agua. Estos elementos se presentan como criterios de evaluación y no como resultados cuantificados por el estudio. El abastecimiento urbano, la agricultura, la industria, la pesca, la biodiversidad y el turismo dependen del lago y de la cuenca. Las metas empresariales deben evitar impactos energéticos, alimentarios o ecológicos no considerados (Morris, 2024).

La gobernanza adaptativa reconoce que las condiciones hidrológicas, tecnológicas y sociales cambian. Las reglas deben poder ajustarse mediante monitoreo y aprendizaje, sin generar incertidumbre permanente. Los proyectos requieren indicadores y revisiones periódicas cuando los resultados no coincidan con las metas (Saikia y Jiménez, 2023).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. Se relacionó literatura sobre gobernanza de cuencas, acción colectiva, redes interorganizacionales, gestión empresarial del agua, justicia hídrica y resiliencia.

La revisión incluyó artículos científicos, capítulos académicos, documentos institucionales, información hidrológica e informes oficiales sobre el lago de Chapala, la cuenca Lerma-Chapala y la participación empresarial. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2025 y se incorporó una fuente institucional sin fecha: Comisión Estatal del Agua de Jalisco (s. f.), utilizada únicamente para información descriptiva básica del lago.

La búsqueda utilizó términos en español e inglés relacionados con gobernanza de cuencas, acción colectiva empresarial, gestión responsable del agua, lago de Chapala, cuenca Lerma-Chapala, redes de gobernanza, justicia hídrica, contaminación y resiliencia.

Los criterios de inclusión fueron pertinencia, actualidad, procedencia académica u oficial y claridad argumentativa o metodológica. Se excluyeron materiales sin evidencia verificable y textos que atribuían beneficios automáticos a la participación empresarial sin analizar riesgos institucionales o distributivos.

La información se organizó en siete categorías: interdependencia territorial; responsabilidad empresarial; metas contextualizadas; coordinación multiactor; financiamiento; monitoreo e información; e integridad, equidad y rendición de cuentas. Después se integraron en un modelo de acción colectiva para Chapala.

Los resultados son una síntesis teórica y no una evaluación de empresas, proyectos o plataformas específicas. La información disponible no permite comparar homogéneamente el consumo, las descargas, la inversión y los resultados territoriales de todas las empresas vinculadas con la cuenca. Esta limitación constituye un problema de gobernanza.

Resultados

El primer resultado es que el riesgo empresarial relacionado con Chapala debe evaluarse a escala de cuenca. Las operaciones abastecidas por el sistema metropolitano, los pozos o los proveedores agrícolas forman parte del mismo sistema sociohidrológico. Sus riesgos no pueden explicarse solo por la ubicación de las plantas (Sojamo y Rudebeck, 2024).

Una empresa del Área Metropolitana de Guadalajara puede utilizar agua del lago, adquirir materias primas agropecuarias producidas en otras zonas y descargar al alcantarillado conectado con plantas o cauces de la región. El diagnóstico debe integrar la operación, la cadena de valor y la trayectoria territorial del agua (Conagua, 2023).

La interdependencia incluye consumos indirectos. El abastecimiento urbano, la salud de los trabajadores y la infraestructura pública sostienen los servicios tecnológicos, comerciales y logísticos. Una disrupción puede afectar la mano de obra, el transporte, la salud y la reputación.

El segundo resultado es que la acción colectiva debe comenzar con un diagnóstico compartido sobre disponibilidad, calidad, usos, descargas, eco-

sistemas y vulnerabilidad. Sin una base común, cada actor define el problema según sus intereses y selecciona intervenciones incompatibles.

El diagnóstico debe distinguir el lago de la cuenca completa. Una intervención local puede mejorar un sitio sin modificar presiones aguas arriba, mientras que las acciones en Guanajuato o Michoacán alteran escurrimientos y contaminantes que llegan a Jalisco. La unidad de análisis debe corresponder al proceso que se pretende resolver.

La información hidrológica debe integrarse junto con datos socioeconómicos. Las comunidades que dependen de la pesca, el turismo, la agricultura, el comercio y los servicios ecosistémicos pueden ver afectados sus ingresos, su salud, su movilidad y sus prácticas culturales ante disminuciones del nivel del agua o la degradación de la calidad, incluso cuando no se reflejan en los balances volumétricos (López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

El diagnóstico debe incluir un mapa de actores e intereses: autoridades federales, estatales y municipales; organismos operadores; distritos y módulos de riego; industrias; agricultores; organizaciones ambientales; comunidades ribereñas; pescadores; prestadores turísticos; universidades; y consumidores metropolitanos.

El tercer resultado consiste en separar la responsabilidad individual de la acción colectiva. La empresa debe cumplir todas sus concesiones, permisos y obligaciones de descarga antes de ser elegible para el reconocimiento por resultados colectivos. Financiar una iniciativa ambiental no es un sustituto de una conducta ilegal ni compensa automáticamente cualquier daño resultante.

Los balances por instalación deben distinguir extracción, captación, recirculación, consumo consuntivo, descarga y calidad de los flujos. Los datos corporativos agregados son insuficientes cuando una empresa opera en cuencas con condiciones distintas.

La información por instalación permite relacionar el desempeño y las condiciones territoriales e identificar actores con capacidad de contribuir a iniciativas conjuntas. No es necesario divulgar secretos industriales, pero sí datos suficientes para evaluar impactos y compromisos.

Las empresas también deben gestionar sus cadenas de suministro. Por ejemplo, los sectores de alimentos y bebidas podrían depender de cultivos y productos ganaderos obtenidos dentro de la cuenca. Si la producción

primaria representa la mayor parte de la huella, la eficiencia dentro de una planta podría ser relativamente pequeña como parte del riesgo total.

Las políticas de compra pueden promover riego eficiente, gestión de nutrientes, control de descargas y protección del suelo. Los requisitos privados deben acompañarse de capacitación, financiamiento y plazos para evitar la exclusión de pequeños productores.

El cuarto resultado es que las metas deben responder al contexto de la cuenca. Una reducción uniforme de 20 % puede resultar insuficiente si el lago continúa deteriorándose. Los objetivos deben reflejar las condiciones territoriales y la responsabilidad y capacidad de cada participante (Alliance for Water Stewardship, 2024).

Las metas pueden incluir la reducción absoluta de extracciones, el aumento del reúso, la mejora de las descargas, la restauración en zonas prioritarias y el acceso comunitario. Cada una requiere una línea base, un cronograma, responsables e indicadores.

Una ventaja considerable es obtener agua regenerada en lugar de agua convencional. Pero hay que verificar si disminuyen las extracciones. Usar agua tratada en una empresa, mientras se mantienen sus fuentes originales, solo promueve el abastecimiento privado y no mejora las condiciones territoriales.

Los objetivos volumétricos deben considerar la temporalidad y la ubicación. El valor de un ahorro varía entre la estación seca y la lluviosa, y una intervención remota no compensa necesariamente un impacto local.

Los objetivos de calidad deben identificar contaminantes prioritarios, fuentes y rutas. La dispersión de nutrientes y metales varía según la sustancia, por lo que las intervenciones deben basarse en evidencia y no solo en parámetros fáciles de medir (Alvarez-Bobadilla et al., 2023).

El quinto resultado es la necesidad de una cartera de acciones. Ningún proyecto aislado resolverá los problemas de la cuenca. Deben combinarse la reducción de la demanda, el saneamiento, el monitoreo, la conservación, la restauración y el fortalecimiento institucional (Conagua, 2022b).

Reducir pérdidas urbanas puede recuperar volúmenes y mejorar la confiabilidad. Las empresas pueden apoyar mediante contratos de desempeño, financiamiento, detección y asistencia técnica, pero las especificaciones públicas deben definir la propiedad, la operación y el control de los datos.

El tratamiento de aguas residuales es otra prioridad. Las empresas pueden participar en la ampliación, rehabilitación, tratamiento avanzado e infraestructura de reúso. Deben priorizarse proyectos que mejoren efectivamente los cuerpos receptores y no solo obras visibles o cercanas a instalaciones corporativas.

El control público del monitoreo de descargas industriales y municipales debe mantenerse. Las empresas pueden financiar laboratorios, estaciones o plataformas, pero no seleccionar unilateralmente los puntos de muestreo, interpretar los resultados o decidir la publicación de incumplimientos.

La restauración de humedales, riberas y zonas de recarga puede favorecer la retención de sedimentos, la biodiversidad, la calidad y la regulación hidrológica. Requiere selección científica, continuidad y coordinación con propietarios y comunidades. Plantar árboles sin base ecológica ni seguimiento no equivale a restauración.

Las soluciones basadas en la naturaleza deben complementar, no sustituir, el control de las descargas y las extracciones. Un proyecto de restauración no es un intercambio por la contaminación continua. La jerarquía de recuperación debe comenzar con la evitación del impacto y, solo después, con la restauración para reparar el daño residual.

El sexto resultado es que la plataforma colectiva debe apoyarse en instituciones existentes cuando sea posible. El Consejo de Cuenca Lerma-Chapala ofrece un espacio formal de reunión entre autoridades y usuarios. Fortalecerlo puede ser más efectivo que multiplicar iniciativas empresariales aisladas (Conagua, 2022a).

La plataforma necesita una secretaría técnica que gestione información, convoque participantes, dé seguimiento a acuerdos y difunda resultados. La función puede recaer en una institución pública o entidad independiente con un mandato claro y salvaguardas contra el dominio empresarial.

Pueden organizarse grupos técnicos sobre cantidad, calidad, ecosistemas, saneamiento, agricultura y participación comunitaria. Las decisiones generales deben permanecer en un órgano con representación equilibrada.

La representación empresarial debe ser diversa en tamaño y sector. Las cámaras pueden facilitar la coordinación, pero no siempre reflejan las condiciones de las pequeñas y medianas empresas. Debe evitarse que los grandes conglomerados monopolicen los espacios.

La representación social requiere recursos. Las comunidades y organizaciones civiles suelen carecer de personal, transporte y asistencia para participar y revisar documentos técnicos. La igualdad formal no elimina esas diferencias de capacidad (Williams et al., 2023).

Los fondos independientes pueden financiar asistencia técnica, traducción de información, traslados y monitoreo participativo. Las empresas no deben elegir a los asesores de las comunidades.

El séptimo resultado se refiere al financiamiento. Puede combinar aportaciones empresariales, fondos públicos y ambientales, créditos verdes, contratos de desempeño y cooperación internacional. La mezcla amplía la inversión, pero necesita criterios transparentes para seleccionar proyectos.

Las contribuciones pueden calcularse según el consumo, el impacto, la capacidad económica o el beneficio esperado. Un sistema puramente voluntario favorece a quienes se benefician sin aportar. Los mecanismos sectoriales o regulados pueden distribuir las obligaciones con mayor equidad.

Los fondos deben publicar ingresos, gastos, contratos, beneficiarios y resultados. También requieren reglas de conflicto de interés cuando una empresa contribuyente interviene en la selección de proveedores o proyectos relacionados.

Los recursos privados no deben sustituir el presupuesto público. La colaboración es adicional y no exime al Estado de financiar la regulación, la inspección y la garantía de derechos.

El octavo resultado es la necesidad de mecanismos de integridad. Todos los participantes deben divulgar intereses, contribuciones, contratos y afiliaciones. Las decisiones sobre concesiones, inspecciones y sanciones deben permanecer separadas de las plataformas de colaboración.

Las medidas de remediación derivadas de incumplimientos no deben confundirse con colaboración voluntaria. Las empresas no pueden eludir sanciones ni obtener reconocimiento antes de demostrar resultados.

Conceptos como *agua positiva* o *agua neutral* requieren metodologías claras y resultados territoriales. No deben sugerir equivalencias que ignoren la calidad, la ubicación, la temporalidad y los derechos.

Los informes deben comunicar avances y dificultades. Una plataforma que difunde solo éxitos pierde credibilidad. Cuando los resultados son insuficientes, debe explicarlo y ajustar la estrategia.

El noveno resultado es la necesidad de un monitoreo independiente que integre datos oficiales, empresariales, académicos y comunitarios con protocolos, control de calidad y trazabilidad.

El monitoreo hidrológico debe considerar niveles, volúmenes, caudales y extracciones. El monitoreo de la calidad del agua tiene que cubrir nutrientes, materia orgánica, microorganismos, metales y, especialmente, contaminantes prioritarios. El monitoreo de la vegetación, los peces, los hábitats y las zonas ribereñas es el requisito fundamental para el monitoreo del ecosistema.

Algunos de estos indicadores sociales pueden incluir continuidad y calidad del suministro, impactos en la producción, participación, acceso a la información y resolución de quejas. La gobernanza no puede evaluarse únicamente a través de variables biofísicas.

Los resultados deben publicarse en una plataforma abierta con series históricas, metodologías y archivos descargables. Los tableros simplificados facilitan la consulta, pero no deben sustituir los datos analíticos y detalles técnicos.

Las universidades de Jalisco y otras entidades de la cuenca pueden apoyar la validación, la modelación y la evaluación. Deben preservar su independencia, divulgar el financiamiento y publicar resultados aunque sean desfavorables para los patrocinadores.

El décimo resultado es que la justicia hídrica debe incorporarse. Las comunidades ribereñas no son solo beneficiarias; poseen conocimientos sobre los cambios del lago, la pesca, la vegetación y el territorio que resultan útiles para el diagnóstico (López Gómez y Juárez Aguilar, 2024).

La participación debe ocurrir a nivel de definir cuál es el problema, no solo una vez que un proyecto ha sido diseñado. Las comunidades deben poder cuestionar prioridades, presentar alternativas y comprender cómo se refleja su aporte.

La acción colectiva no debe priorizar exclusivamente el abastecimiento metropolitano e ignorar los problemas de acceso y calidad de las comunidades ribereñas. La proximidad de estas comunidades al lago no reduce sus derechos.

Toda intervención debe analizar sus efectos distributivos. Un proyecto puede beneficiar a usuarios urbanos e imponer costos a pescadores, agri-

cultores o comunidades. La evaluación debe identificar esos impactos y establecer rediseños, medidas de reparación o compensaciones.

Los mecanismos de queja deben ser accesibles, independientes y contener plazos de respuesta. Si bien las empresas aún pueden tener sistemas internos, las disputas relacionadas con la cuenca deben desarrollarse en plataformas de múltiples partes interesadas y ser accesibles en los ámbitos administrativos y judiciales.

El undécimo resultado es la necesidad de protocolos de sequía y emergencia. Las empresas deben definir con anticipación reducciones escalonadas, prioridades operativas, fuentes de respaldo, apoyo a servicios esenciales y reglas de transparencia durante periodos críticos.

Los protocolos deben priorizar el consumo humano y doméstico. La contribución empresarial puede incluir reducciones temporales y transferencia de volúmenes, pero debe sujetarse a reglas previamente definidas y no negociarse únicamente durante la crisis.

La planeación anticipada permite ajustar la producción, reduce los conflictos reputacionales y evita respuestas arbitrarias que ignoren la continuidad de actividades esenciales.

Por lo tanto, los escenarios deben entrelazar la sequía, la contaminación, la interrupción de la infraestructura y las fallas de energía. Un sistema resiliente es aquel que ofrece eficiencia ordinaria, pero también redundancia, información y capacidad de recuperación para el resto de la cuenca (Saikia y Jiménez, 2023).

El duodécimo resultado es la continuidad y el aprendizaje. Los problemas históricos de la cuenca no pueden resolverse con campañas anuales sujetas a cambios administrativos. Se requieren compromisos plurianuales y mecanismos que sobrevivan a los relevos empresariales y gubernamentales.

Cada proyecto debe contar con una teoría del cambio que vincule actividades, productos, resultados e impactos. Construir una planta, instalar sensores o restaurar hectáreas son productos; su resultado debe expresarse en mejoras verificables de cantidad, calidad, ecosistemas o acceso.

Las evaluaciones intermedias deben permitir abandonar intervenciones ineficaces y reasignar recursos. Continuar una inversión solo para evitar reconocer pérdidas prolonga gastos sin generar valor.

El análisis sustenta un modelo integrado de acción colectiva con siete componentes: diagnóstico compartido, responsabilidad individual, metas contextualizadas, plataforma multiactor, cartera territorial, financiamiento integral y monitoreo independiente.

El diagnóstico compartido define las presiones y prioridades. La responsabilidad individual impide sustituir obligaciones por proyectos externos. Las metas contextualizadas relacionan el desempeño empresarial con las necesidades de la cuenca.

La plataforma multiactor articula gobiernos, empresas, comunidades, usuarios y academia; la cartera territorial integra producción, ecosistemas y acceso; la regulación pública conserva las decisiones de asignación; y el monitoreo independiente verifica resultados y permite ajustes.

El modelo opera en tres escalas: la instalación, donde se reducen el consumo y las descargas; la cadena de valor, donde cambian las prácticas de proveedores y compradores; y la cuenca, donde se gestionan riesgos compartidos.

Los indicadores deben incluir la extracción y el consumo empresarial, la calidad de las descargas, el agua convencional sustituida, las pérdidas reducidas, el volumen tratado y reutilizado, la restauración ecológica verificada, el acceso comunitario, la participación efectiva, el cumplimiento de acuerdos y la evolución de la cantidad y calidad del lago.

La adicionalidad es la prueba principal: debe demostrarse qué cambió gracias a la intervención, si el cambio se mantendrá y si no produjo efectos adversos.

Conclusiones

El lago de Chapala es un proveedor clave de agua para Jalisco y un sistema socioecológico cuya sostenibilidad depende de decisiones a lo largo de toda la cuenca Lerma-Chapala. Su importancia para el abastecimiento de Guadalajara, las comunidades ribereñas, la producción, el turismo y los ecosistemas hace necesaria una gobernanza que trascienda los límites administrativos y sectoriales.

Los problemas se relacionan con la variabilidad hidrológica, el crecimiento de la demanda, la contaminación, la infraestructura, la desigualdad

y la fragmentación institucional. Ninguna empresa, autoridad o comunidad puede resolverlos de manera aislada.

La acción colectiva empresarial puede aportar financiamiento, tecnología, información, capacidad de ejecución e innovación. Su efectividad depende de fortalecer las instituciones públicas, reconocer los derechos comunitarios y producir resultados verificables en la cuenca.

La colaboración no antecede a la responsabilidad individual. Cada empresa debe cumplir, reducir su consumo, tratar sus descargas y transparentar sus impactos antes de recibir reconocimiento por proyectos colectivos. Las inversiones externas no subsanan incumplimientos internos.

Las metas empresariales deben definirse territorialmente. Una menor intensidad no representa mejora si aumenta la extracción total o la cuenca continúa deteriorándose. Los indicadores deben abarcar cantidad, calidad, ecosistemas, acceso y gobernanza.

El Consejo de Cuenca Lerma-Chapala puede constituir una base para coordinar la participación empresarial, siempre que cuente con representación equilibrada, capacidad técnica, información accesible y mecanismos que reduzcan las asimetrías de poder.

El financiamiento privado debe ser adicional, transparente y proporcional a las responsabilidades y beneficios. Las aportaciones no pueden influir en concesiones, inspecciones, sanciones ni prioridades públicas.

El monitoreo independiente es esencial. Los protocolos verificables deben integrar datos empresariales, gubernamentales, científicos y comunitarios y publicarlos en formatos abiertos. La transparencia comprende logros, incidentes, limitaciones y medidas correctivas.

La justicia hídrica debe ocupar un lugar central. Las comunidades ribereñas no pueden subordinarse a intereses metropolitanos o empresariales. Su participación requiere información, asistencia técnica y capacidad real de decisión.

El modelo articula diagnóstico común, responsabilidad individual, metas contextualizadas, coordinación, cartera territorial, financiamiento y monitoreo. Su aplicación permite distinguir la acción colectiva genuina de las intervenciones fragmentadas o reputacionales.

La acción colectiva no sustituye la regulación. El Estado conserva la autoridad sobre la asignación, la prioridad del consumo humano, la super-

visión y la sanción. La colaboración empresarial solo es legítima cuando fortalece las capacidades públicas y sociales.

El futuro del lago de Chapala dependerá de convertir las demandas particulares en compromisos territoriales duraderos. Para las empresas, esto implica reconocer que su competitividad depende no solo del agua que llega a sus instalaciones, sino de la salud, la legitimidad y la resiliencia del sistema compartido.

Referencias

- Alliance for Water Stewardship. (2024). Unpacking collective action in water stewardship: Shared water challenges and collective solutions. https://a4ws.org/wp-content/uploads/2024/06/unpacking_collective_action_final_june-2024.pdf
- Alvarez-Bobadilla, J. I., Murillo-Delgado, J. O., Badillo-Camacho, J., Barcelo-Quintal, I. D., Zárate-del Valle, P. F., Reynaga-Delgado, E., y Gomez-Salazar, S. (2023). Modeling fate and transport of nutrients and heavy metals in the waters of a tropical Mexican lake to predict pollution scenarios. *Water*, 15(9), 1639. <https://doi.org/10.3390/w15091639>
- Bawarshi Abarzúa, G. E., y Glückler, J. (2023). Network governance at the margin of the state: Rural drinking water communities in Chile. *Environmental Management*, 71, 451-464. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01760-2>
- Comisión Estatal del Agua de Jalisco. (s. f.). Lago de Chapala. <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/>
- Comisión Nacional del Agua. (2022a, 25 de mayo). Impulsa Conagua la participación social en la gestión del agua mediante los consejos de cuenca. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/impulsa-conagua-la-participacion-social-en-la-gestion-del-agua-mediante-los-consejos-de-cuenca>
- Comisión Nacional del Agua. (2022b, 29 de diciembre). Concreta Conagua acciones de agua potable, saneamiento y planificación hídrica en Jalisco. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/concreta-conagua-acciones-de-agua-potable-saneamiento-y-planificacion-hidrica-en-jalisco>
- Comisión Nacional del Agua. (2023, 1 de marzo). Conagua contribuye al saneamiento del río Santiago. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/conagua-contribuye-al-saneamiento-del-rio-santiago>
- Congreso del Estado de Jalisco. (2022, 22 de agosto). Presentan plataforma para el manejo integral del lago de Chapala. <https://www.congresoal.gob.mx/node/12365>
- Congreso del Estado de Jalisco. (2024, 8 de marzo). Legislativo pide supervisar descargas de aguas hacia el lago de Chapala. <https://www.congresoal.gob.mx/boletines/legislativo-pide-supervisar-descargas-de-aguas-hacia-el-lago-de-chapala>
- Gobierno del Estado de Jalisco. (2024). Crecer al estilo Jalisco: Agenda de crecimiento

- y desarrollo económico 2024-2030. <https://participa.jalisco.gob.mx/biblioteca/ficha/ver/2527>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Censos Económicos 2024: Resultados definitivos. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>
- López Gómez, L., y Juárez Aguilar, A. (2024). Las complejidades del lago Chapala: Características, importancia, gobernanza y retos futuros. En S. Herrera Lima (Ed.), *Crisis sociohídrica en la ribera del lago de Chapala* (pp. 41-69). ITESO. <https://doi.org/10.31391/FCWJ1428.5>
- Morris, J. C. (2024). Can the Sustainable Development Goals support nexus thinking in companies? The case of water. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 679-691. <https://doi.org/10.1002/bse.3515>
- Saikia, P., y Jiménez, A. (2023). Governance attributes for building water resilience: A literature review. *Water International*, 48(7), 809-838. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2274162>
- Sojamo, S., y Rudebeck, T. (2024). Corporate engagement in water policy and governance: A literature review on water stewardship and water security. *Water Alternatives*, 17(2), 292-324. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol17/v17issue2/757-a17-2-15>
- Williams, S. A., Eden, S., Megdal, S. B., y Joe-Gaddy, V. (2023). Diversity, equity, inclusion, and justice in water dialogues: A review and conceptualization. *Journal of Contemporary Water Research y Education*, 177, 113-139. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2022.3386.x>

8. Puebla: responsabilidad empresarial y colaboración intersectorial para el saneamiento del río Atoyac*



CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ**

EUGENE HAKIZIMANA***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.08>

Resumen

La Cuenca Alta del Atoyac concentra numerosas actividades urbanas e industriales del centro de México y, al mismo tiempo, constituye uno de los sistemas fluviales más afectados por descargas municipales, industriales, agrícolas y ganaderas, así como por la disposición de residuos sólidos. El objetivo del capítulo es analizar, mediante una investigación teórica y documental, la responsabilidad empresarial y las condiciones necesarias para desarrollar una colaboración intersectorial orientada al saneamiento. La revisión integra aportes sobre responsabilidad ambiental corporativa, justicia hídrica, gobernanza colaborativa, tratamiento de aguas residuales, monitoreo de cuencas y restauración. Los resultados muestran que la cooperación voluntaria no puede sustituir el cumplimiento normativo ni la reparación de los daños. El saneamiento exige responsabilidades verificables, control en la fuente, inversión en infraestructura, apoyo a las pequeñas empresas e información pública confiable. Se propone un modelo basado en prevención, regularización diferenciada, tratamiento adecuado, infraestructura compartida, monitoreo independiente, participación comunitaria

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252> ; Scopus ID: 57209292143 ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

*** Doctor en Ciencias Económicas. Profesor-investigador en la Escuela Superior de Comercio y Administración (unidad Santo Tomás), Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1804-1516> ; Scopus ID: 57192373996

y financiamiento multiactor. Se concluye que la legitimidad de la colaboración depende de fortalecer la supervisión pública, reducir de manera demostrable las cargas contaminantes y proteger la salud y los derechos de las comunidades.

Palabras clave: *responsabilidad empresarial, saneamiento, contaminación industrial, río Atoyac.*

Introducción

El río Atoyac es uno de los sistemas hidrológicos más importantes de Puebla y Tlaxcala. Nace en las laderas de la Sierra Nevada, atraviesa territorios rurales, urbanos e industriales y recibe caudales de ríos, barrancas, canales y sistemas de drenaje hasta llegar al embalse Manuel Ávila Camacho, conocido como Valsequillo. La cuenca pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas y sostiene actividades agrícolas, industriales, comerciales y urbanas, además de servicios ecosistémicos para numerosas comunidades (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2022, 2026a).

El proyecto federal de saneamiento y restauración del Alto Atoyac comprende 70 municipios vinculados con los ríos Zahuapan, Atoyac y Alseseca: 48 en Tlaxcala y 22 en Puebla. Esta amplitud territorial muestra que el problema no puede resolverse únicamente desde la ciudad de Puebla ni mediante intervenciones aisladas en determinados tramos. Las descargas y alteraciones originadas en la parte alta se acumulan y afectan a comunidades y ecosistemas situados aguas abajo (Semarnat, 2026a, 2026b).

La cuenca ha experimentado un prolongado proceso de urbanización e industrialización. A lo largo de sus márgenes y afluentes se localizan corredores textiles, químicos, petroquímicos, metalúrgicos, alimentarios, automotrices y de autopartes, así como instalaciones dedicadas a la fabricación de papel y bebidas. Estas actividades han contribuido al desarrollo económico regional, pero también generan efluentes con materia orgánica, sólidos, grasas, colorantes, solventes, metales y otras sustancias cuya composición y peligrosidad varían según el sector (Covarrubias-López et al., 2023; Semarnat, 2022).

La contaminación del Atoyac no puede atribuirse exclusivamente a la industria. También intervienen las descargas domésticas sin tratamiento, la operación deficiente de plantas municipales, las conexiones irregulares, los sistemas de drenaje inadecuados, los residuos sólidos, los tiraderos clandestinos, la ganadería cercana a los cauces, la escorrentía agrícola, la ocupación de zonas federales y la pérdida de vegetación ribereña. La evaluación federal identificó 976 descargas directas de aguas residuales, 685 depósitos de desechos y escombros, 11 fosas sépticas, 414 invasiones de zona federal y 60 taponamientos, además de diversos sitios que requieren atención ambiental y reforestación (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2025).

La multiplicidad de fuentes impide reducir el problema a una dicotomía entre empresas y gobierno. El saneamiento exige que las industrias prevengan y traten la contaminación de sus procesos; que los municipios y organismos operadores recolecten y traten las aguas residuales domésticas; que las autoridades federales y estatales regulen, inspeccionen y monitoreen; y que la sociedad participe en la disposición adecuada de residuos, la vigilancia territorial y la rendición de cuentas. Se requieren responsabilidades diferenciadas, pero coordinadas dentro de una estrategia común (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024; Semarnat, 2024).

La evidencia científica confirma la gravedad del deterioro. Covarrubias-López et al. (2023) evaluaron la contaminación antropogénica en ríos y cuerpos de agua del Área Metropolitana de Puebla e identificaron parámetros fisicoquímicos fuera de los límites aplicables, además de respuestas citotóxicas en el biomodelo utilizado. El estudio relacionó los niveles de contaminación con la concentración poblacional y la densidad de establecimientos industriales en zonas conectadas con los ríos Rabanillo y Atoyac y con las presas Echeverría y Covadonga.

La contaminación constituye también un problema de salud pública. Las comunidades afectadas reportan malos olores, cambios de color del agua, enfermedades, exposiciones ocupacionales, daños económicos a la agricultura y falta de comunicación clara sobre los riesgos. Svarch Pérez et al. (2025) muestran que habitantes y servidores públicos de la Cuenca Alta del Atoyac perciben un riesgo elevado, por lo que se requieren mejores mecanismos de regulación sanitaria, comunicación de riesgos, coordinación multinivel y prevención.

Los efectos económicos tampoco son menores. La contaminación genera costos de atención médica, pérdida de productividad, daños a los cultivos, mayores necesidades de tratamiento, disminución del valor inmobiliario y pérdidas de biodiversidad, turismo y oportunidades de uso del agua. Estos costos se distribuyen de forma desigual, pues con frecuencia recaen en hogares, productores y comunidades que no recibieron la mayor parte de los beneficios del desarrollo industrial (Ibarrarán et al., 2021; Mitchell y Rabassa, 2024).

En 2017, la Comisión Nacional de los Derechos Humanos emitió la Recomendación 10/2017 por violaciones a los derechos a un medio ambiente sano, al saneamiento del agua y al acceso a la información relacionadas con la contaminación de los ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes. La recomendación se dirigió a autoridades federales, estatales y municipales y documentó deficiencias de inspección, tratamiento, coordinación y protección de las poblaciones de Puebla y Tlaxcala (Comisión Nacional de los Derechos Humanos [CNDH], 2017).

Los acuerdos, grupos de trabajo y programas posteriores no han sido suficientes para resolver un problema de esta magnitud. En 2024 se celebraron reuniones de seguimiento de la recomendación, centradas en el uso de recursos para drenaje, tratamiento y saneamiento. Asimismo, el Programa de Acciones de Saneamiento buscó coordinar la intervención de autoridades ambientales y fortalecer la participación social tanto en la parte alta como en la baja del río (Semarnat, 2024).

La restauración del Atoyac se incorporó entre los proyectos prioritarios de la administración federal iniciada en 2024. Las acciones comprenden rehabilitación y construcción de plantas de tratamiento y colectores, humedales, monitoreo de la calidad del agua, restauración de riberas, reforestación, remediación de pasivos y trabajo con las comunidades. Este enfoque reconoce la necesidad de combinar infraestructura convencional, soluciones basadas en la naturaleza y coordinación institucional y social (Semarnat, 2026a, 2026b).

El sector productivo ha comenzado a participar en reuniones de diagnóstico, actividades de capacitación y acciones de saneamiento. En octubre de 2025, autoridades de Puebla, cámaras empresariales y representantes de empresas revisaron las causas de la contaminación y las vías para cumplir

la normativa. El informe reconoció la coexistencia de descargas industriales y municipales y planteó que los establecimientos incumplidos regularizaran su situación antes de octubre de 2026 (Gobierno del Estado de Puebla, 2025).

La participación empresarial debe evaluarse con criterios rigurosos. La cooperación no puede utilizarse para sustituir inspecciones, negociar límites menos estrictos, evitar sanciones ni presentar actividades de limpieza como equivalentes a la prevención de descargas. Aunque una empresa financie la restauración de una ribera, conserva la obligación de tratar sus efluentes, informar sus emisiones y reparar los daños atribuibles a sus operaciones (Mustafa et al., 2023; Singh et al., 2023).

El capítulo analiza los principios y dimensiones de la responsabilidad ambiental empresarial y propone un modelo de colaboración intersectorial para el saneamiento del río Atoyac en Puebla. La pregunta guía es la siguiente: ¿qué responsabilidades, instrumentos y mecanismos de coordinación pueden articularse para que la participación empresarial contribuya efectivamente al saneamiento, sin debilitar el cumplimiento obligatorio ni trasladar costos al Estado y a las comunidades?

La premisa central es que la recuperación del Atoyac depende de la interacción entre regulación firme y colaboración. La regulación sin capacidad técnica y financiera produce cumplimiento parcial; la cooperación sin inspección ni sanciones puede derivar en voluntarismo, simulación o lavado verde. El modelo debe integrar prevención, cumplimiento, incentivos, asistencia técnica, infraestructura, transparencia, participación comunitaria y reparación.

Aproximación teórica y conceptual

La responsabilidad ambiental empresarial comprende las obligaciones, políticas y prácticas mediante las cuales una organización identifica, previene, controla, comunica y repara los impactos ambientales asociados con sus actividades. No se limita al cumplimiento formal de permisos, sino que debe incorporarse al diseño de inversiones, procesos productivos, decisiones

tecnológicas, contratación de proveedores, gestión de riesgos y relaciones con las comunidades (Liu, 2023; Mustafa et al., 2023).

El nivel mínimo es el cumplimiento normativo. Las empresas deben caracterizar sus efluentes, contar con permisos, medir caudales, operar infraestructura de tratamiento y respetar los límites de descarga. La NOM-001-SEMARNAT-2021 actualizó los límites permisibles para descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación e incorporó parámetros y métodos destinados a fortalecer la protección de los ecosistemas y la salud (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

El cumplimiento de una norma no significa que el riesgo desaparezca. Los efectos acumulativos dependen del número de descargas, el caudal estacional del río, la persistencia de las sustancias y la vulnerabilidad de las poblaciones. La suma de numerosas descargas urbanas e industriales puede generar una carga incompatible con la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, incluso cuando cada efluente cumple individualmente determinados límites (Covarrubias-López et al., 2023; Singh et al., 2023).

La prevención es un componente esencial de la responsabilidad empresarial. Implica evitar la generación innecesaria de contaminantes, sustituir sustancias peligrosas, separar corrientes, mantener los equipos y desarrollar sistemas de contención y respuesta. En numerosos casos resulta menos costoso y riesgoso modificar el proceso de origen que tratar la contaminación después de generada (Singh et al., 2023).

El principio de precaución se aplica cuando existe incertidumbre sobre sustancias o mezclas capaces de causar daños graves. La ausencia de un parámetro en una norma no autoriza su descarga sin control. Los avances del análisis no dirigido muestran que los efluentes industriales pueden contener mezclas complejas de compuestos que los métodos convencionales no siempre detectan (Khan et al., 2024).

De acuerdo con el principio de “quien contamina paga”, el generador debe cubrir los costos de prevención, tratamiento, monitoreo y reparación. No se trata únicamente de pagar una sanción. Ante un daño, pueden requerirse restauración ambiental, suministro alternativo de agua, atención sanitaria, compensación por pérdidas productivas y seguimiento de largo plazo. Trasladar esos costos al presupuesto público equivale a socializar las externalidades de la actividad económica (Mitchell y Rabassa, 2024).

La debida diligencia ambiental extiende la responsabilidad a la cadena de valor. Cuando una empresa subcontrata procesos como teñido, lavado, galvanizado o transporte, debe seleccionar y supervisar adecuadamente a sus proveedores. La subcontratación no puede utilizarse para desplazar las actividades más contaminantes hacia instalaciones pequeñas con menor capacidad de control (Mustafa et al., 2023).

La responsabilidad puede organizarse en cuatro niveles acumulativos: cumplimiento obligatorio; prevención y mejora más allá de los mínimos; reparación de daños; y colaboración frente a problemas territoriales compartidos. La participación en una iniciativa colectiva no exime del cumplimiento ni del deber de reparar.

La colaboración intersectorial coordina a instituciones públicas, empresas, organizaciones sociales, comunidades y universidades para atender un problema que ningún actor puede resolver de manera aislada. En la restauración de ríos permite movilizar financiamiento, información, tecnología, conocimiento territorial y capacidad de ejecución (Bai et al., 2024; Xia et al., 2024).

La gobernanza colaborativa no significa que todos los participantes tengan funciones o poderes idénticos. Las autoridades conservan la regulación, inspección, sanción y protección de derechos; las empresas controlan sus procesos y financian sus obligaciones; las universidades aportan conocimiento; y las comunidades contribuyen con experiencia territorial, monitoreo y definición de prioridades. La claridad de funciones evita que la colaboración diluya responsabilidades (Xia et al., 2024).

La colaboración requiere objetivos comunes, reglas de participación, acceso a la información, confianza, transparencia, autoridad legítima y mecanismos de resolución de controversias. La celebración de reuniones no constituye gobernanza colaborativa cuando las decisiones ya se tomaron o los actores con mayor poder controlan la agenda (Bai et al., 2024).

La justicia ambiental permite examinar quién recibe los beneficios del desarrollo económico y quién soporta los costos de la contaminación. Las comunidades cercanas a corredores industriales pueden enfrentar exposición, olores, pérdida de medios de vida y riesgos sanitarios, mientras los beneficios se distribuyen en territorios más amplios. Esta desigualdad exige justicia distributiva, procedimental y de reconocimiento.

La colaboración también requiere libertad de información. Las comunidades deben saber quién descarga, qué sustancias se miden, cómo se analizan y qué acciones se adoptan. La información excesivamente agregada o técnica puede convertirse en una barrera para la vigilancia social. Los datos deben presentarse por instalación o zona, acompañados de series y explicaciones comprensibles (CNDH, 2017).

El Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes es una herramienta para reportar liberaciones de sustancias al agua, aire, suelo y residuos. Su utilidad a escala de cuenca depende de la cobertura de instalaciones, la calidad de los reportes, la verificación y la vinculación de las emisiones con puntos específicos de descarga (Semarnat, 2023).

La trazabilidad de las descargas consiste en identificar su fuente, composición y trayectoria. En una cuenca con numerosas empresas, intermediarios y sistemas urbanos de tratamiento, los contaminantes pueden mezclarse y dificultar la identificación del responsable. El monitoreo debe integrar mediciones en cada instalación, colectores, afluentes y puntos estratégicos del río (Covarrubias-López et al., 2023).

La caracterización debe adaptarse a cada corriente. Los colorantes, sales, tensioactivos y materia orgánica son frecuentes en efluentes textiles; los metales y aceites, en los metalúrgicos; las grasas y cargas orgánicas, en los alimentarios; y las mezclas variables, en los químicos. Diseñar una planta sin caracterizar las corrientes puede producir un tratamiento inadecuado o inestable (Mejía-Marchena et al., 2023; Singh et al., 2023).

La producción más limpia y la reducción en el origen constituyen el primer nivel de la jerarquía tecnológica. Después deben considerarse la separación de corrientes, la recuperación de recursos, la recirculación, el pretratamiento, los procesos biológicos y fisicoquímicos, las membranas y la oxidación avanzada. La selección debe responder a la composición, el caudal, el uso previsto y la capacidad operativa, y no solo a la novedad de la tecnología (Mejía-Marchena et al., 2023).

Las plantas individuales son adecuadas cuando un establecimiento genera caudales y contaminantes definidos y cuenta con capacidad técnica. Las plantas compartidas pueden servir a pequeñas empresas concentradas en un parque o corredor, pero exigen pretratamiento, normas de admisión, medición y asignación inequívoca de responsabilidades (Singh et al., 2023).

La infraestructura compartida puede generar economías de escala, pero también riesgo moral. Una descarga incompatible puede desestabilizar toda la planta. Los contratos deben fijar límites en el origen, sistemas de detección, sanciones y reglas para recuperar los costos provocados por incumplimientos.

La economía circular del agua ofrece alternativas como la recirculación de corrientes, la recuperación de calor, el reúso y la recuperación de recursos. Sin embargo, el reúso no puede ocultar una descarga final con alta carga contaminante ni trasladar los contaminantes hacia lodos, suelos o productos (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Khan et al., 2024).

Los incentivos económicos pueden facilitar la adopción tecnológica, especialmente entre las pequeñas y medianas empresas. Los créditos, garantías, incentivos fiscales, asistencia técnica y compras consolidadas reducen barreras. El financiamiento debe condicionarse a resultados y no cubrir las obligaciones ordinarias del contaminador (Mustafa et al., 2023).

La evidencia indica que la responsabilidad corporativa, la conciencia ambiental, la reputación y los costos influyen en la instalación de sistemas de tratamiento. Sin monitoreo, información y capacidad organizativa, los incentivos aislados son insuficientes. Deben combinarse obligaciones, apoyo técnico y consecuencias efectivas ante el incumplimiento (Liu, 2023; Mustafa et al., 2023).

La restauración fluvial comprende más que el tratamiento de las descargas. Incluye la remediación de sitios contaminados, el saneamiento y estabilización de riberas, el control de la erosión, la recuperación de humedales y la restitución de hábitats. Las soluciones basadas en la naturaleza pueden complementar el saneamiento, pero no sustituir el control de contaminantes en la fuente (Semarnat, 2026a).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. El diseño permitió vincular estudios sobre contaminación del Alto Atoyac, responsabilidad empresarial, justicia ambiental, tratamiento de aguas residuales, gobernanza colaborativa y restauración de cuencas.

La revisión comprendió investigaciones científicas, normas, recomendaciones de derechos humanos, publicaciones oficiales, programas de salud pública y literatura sobre gestión industrial del agua. Se priorizaron documentos publicados entre 2022 y 2026, y se incorporaron antecedentes anteriores cuando resultaron indispensables para comprender el problema.

La búsqueda documental utilizó términos en español e inglés relacionados con contaminación industrial, Cuenca Alta del Atoyac, río Atoyac, aguas residuales, responsabilidad ambiental, colaboración intersectorial, gobernanza colaborativa, tratamiento industrial, salud ambiental, justicia hídrica y restauración fluvial.

Los documentos se seleccionaron por su pertinencia, procedencia académica u oficial, actualidad, claridad metodológica y utilidad para construir una propuesta aplicable a Puebla. Se excluyeron textos promocionales, materiales sin evidencia verificable y análisis centrados en un solo sector que no distinguían entre fuentes municipales, industriales y territoriales.

La información se organizó en siete categorías: fuentes de contaminación; responsabilidad empresarial; cumplimiento y regularización; capacidades tecnológicas; colaboración y financiamiento; monitoreo y transparencia; y justicia ambiental y participación comunitaria. Las categorías se integraron en un marco de saneamiento corresponsable.

Los resultados constituyen una síntesis teórica aplicada al contexto del Atoyac. No pretenden atribuir responsabilidad jurídica a empresas o municipios específicos ni evaluar proyectos recién iniciados. La falta de información pública homogénea y comparable sobre caudales, cargas, permisos y operación de plantas es una limitación y, al mismo tiempo, un problema central de gobernanza.

Resultados

La contaminación como problema sistémico y multicausal

El primer resultado es que el saneamiento debe reconocer la naturaleza sistémica de la contaminación. Las descargas domésticas aportan materia

orgánica, microorganismos, nutrientes y detergentes; las industriales, contaminantes específicos; las actividades agrícolas y ganaderas, nutrientes, plaguicidas y sedimentos; y los residuos sólidos obstruyen y deterioran los cauces (Conagua, 2025; Covarrubias-López et al., 2023).

El caudal no determina por sí solo la importancia de una fuente. Una descarga industrial de menor volumen puede contener metales, solventes, colorantes o compuestos persistentes con efectos desproporcionados. El diagnóstico debe diferenciar volumen, carga orgánica, toxicidad y persistencia (Khan et al., 2024).

Tampoco es adecuado atribuir el problema únicamente a las grandes empresas. La cuenca incluye empresas medianas, pequeñas y microempresas, talleres y actividades informales. Algunas unidades carecen de infraestructura, capacidad técnica o espacio para tratar sus efluentes, mientras otras eluden deliberadamente el cumplimiento. La política debe distinguir entre limitaciones reales y conductas evasivas.

El inventario de fuentes debe incluir establecimientos, municipios, colectores, plantas de tratamiento, vertederos, sistemas de drenaje y actividades agrícolas. Cada punto debe contar con coordenadas, caudal, composición, frecuencia, autorización y estado de cumplimiento. La información debe actualizarse y permitir el seguimiento de regularizaciones y cierres.

La red de monitoreo debe detectar variaciones espaciales y temporales. La calidad durante la temporada de lluvias puede diferir de la observada en estiaje, cuando existe menor dilución. También deben captarse descargas nocturnas, episodios intermitentes y cambios asociados con los ciclos industriales (Covarrubias-López et al., 2023).

Los análisis de laboratorio pueden complementarse con sensores en línea. El pH, la conductividad, el oxígeno disuelto, la temperatura y la turbidez permiten detectar cambios súbitos, pero no sustituyen los análisis de metales, compuestos orgánicos, ecotoxicidad y microorganismos. Ambos tipos de información deben integrarse.

Responsabilidad individual de las empresas

El segundo resultado es que la colaboración intersectorial solo puede sustentarse en el cumplimiento de cada establecimiento. Las empresas deben caracterizar sus corrientes, prevenir contaminantes, operar adecuadamente sus plantas y verificar la calidad antes de descargar. Ninguna de estas obligaciones puede equipararse con una contribución colectiva.

La auditoría corporativa del agua debe identificar las fuentes de abastecimiento, los usos en cada proceso, las pérdidas, la recirculación, las descargas y las sustancias empleadas. Los balances permiten localizar oportunidades de prevención, recuperación y tratamiento y establecer una línea base para comparar resultados.

La separación de corrientes es especialmente importante. Mezclar agua de enfriamiento poco contaminada con efluentes concentrados aumenta el volumen que debe tratarse. Asimismo, combinar sustancias incompatibles puede alterar procesos biológicos o provocar reacciones peligrosas (Mejía-Marchena et al., 2023).

La debida diligencia debe abarcar contratistas y proveedores. Las empresas tractoras pueden exigir evidencia de tratamiento, cumplimiento y trazabilidad, pero deben evitar que esos requisitos se conviertan en mecanismos excluyentes. La asistencia técnica, el financiamiento y los periodos de transición son necesarios para proveedores dispuestos a regularizarse.

Los informes corporativos deben desglosar los datos por instalación y no limitarse a totales nacionales o globales. Una reducción en otra cuenca no compensa una descarga al Atoyac. Las metas deben vincularse con el territorio y con el estado del cuerpo receptor.

La gobernanza corporativa puede fortalecer el cumplimiento mediante comités ambientales, auditorías internas, objetivos vinculados con la remuneración directiva y supervisión del consejo de administración. La evidencia indica que los mecanismos de control y la presión externa pueden mejorar la inversión ambiental y el desempeño empresarial (Liu, 2023).

Regularización diferenciada y cumplimiento reforzado

El tercer resultado es que la regularización requiere respuestas diferenciadas. Las grandes empresas deben financiar y operar soluciones propias cuando la composición y el volumen de sus efluentes lo justifiquen. Para las pequeñas empresas pueden ser necesarios sistemas compartidos, servicios móviles, centros de pretratamiento, créditos y capacitación.

Los programas de regularización deben incluir diagnósticos documentados, metas intermedias, plazos definidos y verificación. Establecer fechas sin apoyo técnico ni capacidad de inspección genera declaraciones formales sin resultados; extender indefinidamente los plazos debilita la regulación y prolonga el daño (Gobierno del Estado de Puebla, 2025).

Los programas de apoyo deben exigir medición, auditorías y divulgación de los efluentes. Los recursos públicos pueden financiar infraestructura colectiva y asistencia técnica con beneficios territoriales, pero no sanciones, reparación de daños ni inversiones ordinarias de empresas solventes.

La certificación puede complementar, pero no sustituir, la regulación. Un certificado acredita procedimientos durante un periodo determinado; no garantiza la ausencia de incumplimientos futuros. Las autoridades deben conservar sus facultades de inspección y sanción.

Los incentivos deben vincularse con la reducción de cargas contaminantes y no solo con la compra de equipos. Una planta instalada que permanece inactiva por falta de personal, energía o mantenimiento no constituye un resultado. Deben medirse el caudal tratado, el cumplimiento, la continuidad operativa, la gestión de lodos y la reducción de toxicidad.

La regulación debe abarcar tanto las descargas directas al río como las vertidas al alcantarillado. Un residuo industrial que una planta municipal no puede tratar puede dañar la red, poner en riesgo a los trabajadores y desestabilizar los procesos biológicos. Por ello, el pretratamiento industrial resulta indispensable.

Estrategia tecnológica e infraestructura compartida

El cuarto resultado es que la estrategia tecnológica debe partir de la prevención y avanzar hacia tratamientos de mayor complejidad solo cuando sean necesarios. No existe una planta capaz de tratar adecuadamente todos los efluentes. La caracterización sectorial debe determinar qué contaminantes se previenen, recuperan, separan o eliminan (Singh et al., 2023).

Los procesos biológicos, como la digestión anaerobia, pueden emplearse en efluentes con cargas orgánicas elevadas. Para corrientes con metales, aceites o colorantes pueden requerirse tratamientos fisicoquímicos, adsorción, membranas u oxidación avanzada. Los sistemas híbridos mejoran la remoción, pero implican mayores exigencias operativas y de mantenimiento (Mejía-Marchena et al., 2023).

Las plantas compartidas pueden desarrollarse en parques y corredores industriales cuando las empresas están próximas, sus efluentes son compatibles y existe una demanda suficiente. El pretratamiento en cada instalación debe impedir que una descarga tóxica alcance la planta común.

La planta compartida requiere operación profesional, contratos, laboratorio y medidores en cada conexión. La tarifa puede combinar volumen y carga contaminante, de modo que las corrientes más complejas cubran una proporción mayor del costo. Cobrar únicamente por volumen genera incentivos inadecuados.

El operador debe tener facultad para rechazar descargas fuera de especificación y recuperar los costos de los incidentes. También se necesita un fondo permanente para mantenimiento, actualización tecnológica y contingencias; depender exclusivamente de presupuestos anuales pone en riesgo la continuidad.

Las plantas municipales deben dimensionarse de acuerdo con los caudales reales, la red de colectores y la capacidad financiera y operativa. Aumentar capacidad sin drenajes troncales, energía, personal y presupuesto de mantenimiento produce infraestructura subutilizada. El saneamiento comprende recolección, conducción, tratamiento, descarga segura y, cuando sea viable, reúso. Las soluciones basadas en la naturaleza, como humedales construidos y cauces restaurados, pueden complementar el tratamien-

to, especialmente en comunidades pequeñas. Ofrecen bajo consumo energético, generación de hábitat y amortiguamiento de cargas, pero requieren suelo, diseño, protección contra descargas tóxicas y mantenimiento (Semarnat, 2026a).

Colaboración y gobernanza intersectorial

El quinto resultado es la necesidad de una plataforma intersectorial oficial y permanente. El Grupo de Trabajo Interinstitucional existente puede constituir una base, pero requiere mecanismos claros para incorporar a empresas, cámaras, comunidades, academia y organizaciones civiles sin despojar a las autoridades de sus facultades (Semarnat, 2024).

La plataforma debe organizarse a escala de cuenca y por subzonas. San Martín Texmelucan, Huejotzingo, Cuautlancingo, Coronango, la ciudad de Puebla y el río Alseseca presentan combinaciones distintas de actividades y descargas. Los grupos territoriales pueden definir medidas específicas dentro de una estrategia común.

La representación empresarial debe reflejar distintos tamaños y sectores. Las cámaras facilitan el diálogo, pero no siempre representan toda la diversidad productiva. Las grandes empresas no deben dominar la toma de decisiones.

Las comunidades necesitan representación efectiva. La igualdad formal en una reunión no compensa las diferencias de conocimiento, tiempo y recursos. Deben existir fondos para asistencia técnica, asesoría independiente, monitoreo comunitario y participación.

Las universidades pueden caracterizar contaminantes, evaluar tecnologías y riesgos y verificar resultados. Su participación debe asegurar transparencia del financiamiento, acceso a datos y libertad para publicar resultados desfavorables.

Los espacios de colaboración deben mantenerse separados de los procedimientos de inspección y sanción. Financiar iniciativas comunes no puede otorgar a una empresa un trato regulatorio preferente. Las autoridades que emiten permisos e inspeccionan deben preservar su independencia respecto de los actores supervisados.

Financiamiento y asignación de responsabilidades

El sexto resultado es que el financiamiento del saneamiento debe distribuirse entre varios actores. Los gobiernos deben financiar colectores principales, sistemas municipales, supervisión pública y restauración de bienes comunes. Las empresas deben cubrir la prevención, el tratamiento y la reparación de los daños derivados de sus efluentes. Los fondos compartidos pueden apoyar infraestructura regional con beneficios públicos claros.

Las contribuciones empresariales pueden calcularse según el consumo, el caudal y la carga contaminante, la capacidad económica y los beneficios esperados. Una tarifa fija afectaría desproporcionadamente a las pequeñas empresas, mientras que un esquema puramente voluntario permitiría que algunos usuarios se beneficiaran sin contribuir.

Los contratos de desempeño pueden aplicarse a plantas de tratamiento, colectores y sistemas de monitoreo. Una parte del pago debe depender de la reducción verificada de cargas, la disponibilidad de la infraestructura y el cumplimiento. Las líneas base y la verificación independiente son indispensables.

La participación privada no elimina el gasto público. La inversión se recupera mediante tarifas, pagos gubernamentales o contratos de servicio. La decisión debe comparar costos, riesgos y capacidades con los de la contratación tradicional (Bai et al., 2024).

Las asociaciones de largo plazo requieren condiciones de pago, garantías, penalizaciones y procedimientos de modificación transparentes. El socio privado puede asumir riesgos de construcción y operación, pero la supervisión regulatoria debe permanecer en manos de la autoridad. Los costos de descargas industriales específicas no deben trasladarse a los usuarios domésticos.

El principio de “quien contamina paga” debe coexistir con apoyos para unidades vulnerables. La asistencia facilita el cumplimiento, pero no exime al generador de su responsabilidad. Los créditos y subsidios deben condicionarse a medición, operación y resultados verificables.

Monitoreo, transparencia y rendición de cuentas

El séptimo resultado es la creación de un sistema público e independiente de información. La red debe integrar datos de la Conagua, la Profepa, los gobiernos estatales y municipales, las empresas, las universidades y las comunidades. Cada dato debe incluir fecha, ubicación, método, responsable y procedimiento de verificación.

El diagnóstico debe incluir demanda bioquímica y química de oxígeno, sólidos, microorganismos, oxígeno disuelto y otros parámetros básicos. La diversidad industrial exige además medir metales, toxicidad y compuestos específicos (Conagua, 2025; Covarrubias-López et al., 2023).

Los datos deben publicarse mediante mapas y series históricas. Las clasificaciones por colores facilitan la comunicación, pero deben acompañarse de valores, umbrales y justificaciones. Un sistema de semáforo simplificado no puede representar por sí solo todos los contaminantes.

El monitoreo empresarial debe verificarse mediante muestreo público e independiente. Permitir que el actor supervisado genere y controle toda la información crea asimetrías y reduce la confianza. Los laboratorios deben ser competentes y los resultados auditables.

La ciudadanía debe contar con mecanismos para reportar olores, cambios de color, espuma, mortandad de peces y descargas anormales. Estas observaciones no sustituyen los análisis, pero ayudan a orientar inspecciones y detectar episodios intermitentes.

La publicación de establecimientos incumplidos, medidas correctivas y avances de regularización debe ajustarse al marco jurídico. La transparencia genera incentivos reputacionales y permite evaluar la consistencia de las autoridades.

Participación comunitaria, justicia ambiental y salud

El octavo resultado es que la recuperación del río debe incorporar la protección de la salud pública. Las poblaciones expuestas requieren agua segura, vigilancia epidemiológica, comunicación de riesgos y mecanismos para

investigar la relación entre contaminación y enfermedad (Svarch Pérez et al., 2025).

La comunicación debe reconocer la incertidumbre. Es irresponsable afirmar que no existe riesgo cuando no se ha demostrado una relación causal individual, pero también lo es atribuir toda enfermedad a la contaminación sin evidencia. Las autoridades deben explicar qué se sabe, qué se desconoce y qué medidas preventivas se adoptarán.

La participación comunitaria debe comenzar en la etapa diagnóstica. Los habitantes pueden identificar la ubicación, el momento y la naturaleza de episodios de descarga y documentar usos locales del agua. Este conocimiento ayuda a definir estaciones de monitoreo y evaluar resultados.

La justicia ambiental exige priorizar los territorios más expuestos y con menor capacidad de respuesta. Los proyectos visibles en zonas urbanas no deben desplazar a comunidades rurales que continúan sin saneamiento. La asignación de recursos debe considerar riesgo, población expuesta, vulnerabilidad y daño histórico.

Se requieren mecanismos independientes de queja con plazos y respuestas verificables. Las empresas pueden mantener canales internos, pero las personas deben conservar acceso a autoridades administrativas, sanitarias, ambientales y de derechos humanos.

La restauración debe generar beneficios locales. Las obras, empleos, parques ribereños e infraestructura pueden contribuir a la recuperación social siempre que no desplacen a la población, incrementen injustificadamente el precio del suelo ni permitan la apropiación privada del espacio público.

Modelo de saneamiento corresponsable

A partir de los resultados se propone un modelo integrado con ocho componentes: diagnóstico territorial; responsabilidad individual; regularización diferenciada; infraestructura y tecnología adecuadas; colaboración intersectorial; financiamiento proporcional; monitoreo independiente; y justicia socioambiental.

El diagnóstico territorial identifica fuentes, contaminantes, riesgos y poblaciones expuestas. La responsabilidad individual asigna a cada actor el

control de sus descargas. La regularización diferenciada combina obligaciones, plazos, asistencia y sanciones de acuerdo con la capacidad y la conducta del establecimiento.

La infraestructura y la tecnología articulan prevención, pretratamiento, plantas individuales, sistemas municipales y soluciones compartidas. La colaboración intersectorial coordina autoridades, empresas, academia y organizaciones sociales sin confundir sus responsabilidades.

El financiamiento proporcional distribuye costos según responsabilidad, beneficio y capacidad. El monitoreo independiente verifica el cumplimiento y los resultados. La justicia ambiental prioriza la salud, los derechos y los territorios históricamente afectados.

El modelo opera en tres escalas. En la instalación se previenen y tratan contaminantes; en el corredor industrial o municipio se comparten infraestructura y monitoreo; y en la cuenca se evalúan la calidad del agua, la restauración y la distribución de beneficios.

Los indicadores empresariales deben incluir caudal, carga contaminante, cumplimiento, recirculación, incidentes y mantenimiento. Los indicadores territoriales deben evaluar la calidad del río, las descargas eliminadas, el funcionamiento de las plantas, la recuperación ecológica, la exposición sanitaria y la participación.

La evaluación debe distinguir productos de efectos. Construir una planta, limpiar una ribera u organizar una reunión son productos; los efectos son la reducción sostenida de cargas contaminantes, la recuperación de ecosistemas y la disminución del riesgo sanitario.

Conclusiones

La contaminación del río Atoyac es resultado de décadas de industrialización, urbanización, tratamiento insuficiente de aguas residuales, planeación territorial deficiente y coordinación limitada. Su carácter acumulativo impide resolverla mediante un solo proyecto, una sola autoridad o un único sector.

Las descargas industriales forman parte del problema junto con las municipales, los residuos, las actividades agropecuarias y el deterioro de las

riberas. Reconocer esta diversidad no debe diluir responsabilidades. Cada actor debe responder por las fuentes y procesos que controla.

El cumplimiento normativo constituye el requisito mínimo de la responsabilidad empresarial. Las empresas deben caracterizar sus efluentes, prevenir contaminantes, operar sistemas de tratamiento y proporcionar información verificable. Estas obligaciones no se sustituyen mediante proyectos colectivos.

La colaboración intersectorial puede movilizar recursos, conocimiento, tecnología y capacidad de ejecución. También puede utilizarse para desplazar obligaciones o influir indebidamente en la regulación; por ello, su legitimidad depende de reglas claras, transparencia y separación entre colaboración y supervisión.

La estrategia tecnológica debe diferenciar sectores y tamaños. Las grandes instalaciones pueden operar plantas propias, mientras las pequeñas pueden integrarse en sistemas compartidos sujetos a pretratamiento, medición y reglas de admisión.

Las plantas municipales requieren colectores, energía, personal, presupuesto y mantenimiento. La infraestructura que no opera de manera continua reproduce el círculo de subutilización y descarga sin tratamiento.

Los incentivos públicos deben condicionarse a reducciones verificables de cargas y a la operación sostenida de los equipos. Financiar infraestructura sin asegurar su funcionamiento no equivale a sanear. Los contratos de desempeño pueden distribuir los riesgos de operación y mantenimiento.

El saneamiento requiere un sistema independiente de monitoreo y transparencia. Las fuentes, métodos, resultados, incumplimientos y medidas correctivas deben ser públicos. Los datos excesivamente agregados o bajo control exclusivo de los actores supervisados son insuficientes.

La justicia sanitaria y ambiental debe integrarse en la recuperación. Las comunidades no son receptoras pasivas de información, sino participantes con conocimientos y derechos. Las prioridades deben concentrarse en los territorios con mayor exposición y rezago.

La restauración también comprende recuperar riberas, retirar residuos, rehabilitar ecosistemas, controlar ocupaciones irregulares y reconstruir el vínculo social con el río. Las soluciones basadas en la naturaleza complementan, pero no sustituyen, la prevención y el cumplimiento.

El modelo propuesto articula diagnóstico, responsabilidad, regularización, infraestructura, colaboración, financiamiento, monitoreo y justicia. El éxito debe medirse por la reducción de cargas contaminantes, la recuperación de ecosistemas y la mejora de la salud comunitaria, no por el número de obras o reuniones.

La recuperación del Atoyac es posible, pero exige que el desarrollo regional deje de trasladar a la sociedad los costos ambientales y sanitarios de las descargas. Una empresa responsable previene, informa, cumple, repara y participa en una gobernanza territorial transparente.

Referencias

- Bai, Y., Lu, C., Dong, X., y Li, Y. (2024). Role of collaborative governance in unlocking private investment in sustainable projects. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, 699. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03175-2>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2024). Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2017). Recomendación 10/2017 sobre la violación a los derechos humanos a un medio ambiente sano, saneamiento del agua y acceso a la información en relación con la contaminación de los ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes. <https://hist.cndh.org.mx/documento/recomendacion-102017>
- Comisión Nacional del Agua. (2025, 11 de mayo). El Gobierno de México mantiene acciones para el saneamiento del río Atoyac. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/el-gobierno-de-mexico-mantiene-acciones-para-el-saneamiento-del-rio-atoyac>
- Covarrubias-López, A. C., García-Suastegui, W. A., Valencia-Quintana, R., Avelino-Flores, F., Méndez-Bermúdez, A., y Handal-Silva, A. (2023). Human impact in the watershed of the Atoyac River in the Metropolitan Area of Puebla, Mexico. *Sustainability*, 15(13), 10565. <https://doi.org/10.3390/su151310565>
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Gobierno del Estado de Puebla. (2025, 10 de octubre). Avanza diagnóstico para rescate del río Atoyac con participación de sectores productivos. <https://puebla.gob.mx>

- mx/index.php/noticias/item/20865-avanza-diagnostico-para-rescate-del-rio-atoyac-con-participacion-de-sectores-productivos
- Ibarrarán, M. E., Saldaña-Vázquez, R. A., y Pérez-García, T. (2021). The cost of pollution in the Upper Atoyac River Basin: A systematic review. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00095>
- Khan, U. A., Löffler, P., Spilsbury, F., Wiberg, K., Stålsby Lundborg, C., y Lai, F. Y. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136175. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136175>
- Liu, Q. (2023). External governance pressure and corporate environmental responsibility: Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Business Ethics, the Environment y Responsibility*, 32(2), 592–609. <https://doi.org/10.1111/beer.12492>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C., Arismendy-Montes, L., y Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: Advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2198147>
- Mitchell, A. E., y Rabassa, M. (2024). Inequality in environmental risk exposure and procedural justice in the Matanza-Riachuelo River Basin. *Oxford Development Studies*, 52(4), 360-380. <https://doi.org/10.1080/13600818.2024.2334672>
- Mustafa, S., Long, Y., y Rana, S. (2023). The role of corporate social responsibility and government incentives in installing industrial wastewater treatment plants: SEM-ANN deep learning approach. *Scientific Reports*, 13, 16529. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37239-1>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 20 de diciembre). Saneamiento del río Atoyac. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/rioatoyac/articulos/saneamiento-del-rio-atoyac>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat%7Cretc/articulos/registro-de-emisiones-y-transferencia-de-contaminantes>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). Programa de Acciones de Saneamiento en el río Atoyac. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/educacionambiental/acciones-y-programas/programa-de-acciones-de-saneamiento-pas-en-el-rio-atoyac>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2026a, 12 de marzo). Ficha del proyecto: Saneamiento y restauración del río Atoyac y sus tributarios o afluentes en los estados de Puebla y Tlaxcala. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat%7Criosvivos/articulos/ficha-del-proyecto-saneamiento-del-rio-atoyac>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2026b, 9 de marzo). Saneamiento del río Atoyac para el rescate de entornos sociales. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat%7Criosvivos/articulos/saneamiento-del-rio-atoyac-para-el-rescate-de-entornos-sociales>

- Singh, B. J., Chakraborty, A., y Sehgal, R. (2023). A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*, 348, 119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>
- Svarch Pérez, A. E., Suárez-Rienda, V., De la Sierra de la Vega, L. A., y Alcocer Varela, J. C. (2025). Percepción de riesgos a la salud por contaminación industrial en la cuenca del Alto Atoyac: Aportaciones para la regulación sanitaria. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, 581-597. <https://doi.org/10.20937/RICA.55301>
- Xia, Y., Tian, Z., y Ding, C. (2024). Collaborative governance in action: Driving ecological sustainability in the Yangtze River basin. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1463179. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1463179>

9. Veracruz: gestión hídrica y economía circular en los corredores petroquímicos*

CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.09>

Resumen

Veracruz concentra refinerías, complejos petroquímicos, instalaciones de almacenamiento, terminales portuarias y empresas proveedoras que dependen intensamente del agua y generan efluentes de composición compleja. El objetivo del capítulo es analizar, mediante una investigación teórica y documental, las condiciones necesarias para transitar hacia una gestión circular del agua en el corredor Coatzacoalcos-Minatitlán-Cosoleacaque. La revisión integra aportes sobre eficiencia, tratamiento avanzado, reúso, recuperación de recursos, simbiosis industrial y gobernanza territorial. Los resultados indican que la circularidad debe comenzar con balances verificables, prevención del consumo, segregación de corrientes y recirculación interna antes de desarrollar redes compartidas de agua regenerada. Las tecnologías biológicas, fisicoquímicas, de membrana y oxidación avanzada pueden producir agua para enfriamiento, generación de vapor y servicios industriales, pero requieren energía y generan lodos o concentrados que deben gestionarse. Se propone un modelo multiescalar basado en responsabilidad empresarial, infraestructura compartida, contratos de desempeño y verificación independiente de la sustitución de agua convencional. Se concluye que la economía circular puede fortalecer la competitividad y reducir

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252> ; Scopus ID: 57209292143 ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

la contaminación cuando conserva la rectoría pública y prioriza el abastecimiento humano y la protección de los ecosistemas.

Palabras clave: *economía circular del agua, industria petroquímica, reúso industrial, simbiosis industrial.*

Introducción

Veracruz ocupa una posición estratégica en la industria energética y petroquímica mexicana. En el sur del estado se localiza el corredor integrado por Coatzacoalcos, Minatitlán, Cosoleacaque, Nanchital e Ixhuatlán del Sureste, donde convergen la refinería Lázaro Cárdenas, los complejos petroquímicos Cangrejera, Morelos, Pajaritos y Cosoleacaque, instalaciones privadas, terminales portuarias, ductos, centros de almacenamiento y empresas proveedoras. Esta concentración conforma uno de los principales sistemas industriales del Golfo de México (Ontiveros-Cuadras et al., 2026; Petróleos Mexicanos [Pemex], 2026a).

Los complejos de la zona producen o procesan etileno, polietileno, aromáticos, amoníaco, fertilizantes, glicoles, hidrocarburos y otros insumos destinados a las industrias del plástico, transporte, agricultura, construcción, textiles, productos químicos y bienes de consumo. La articulación de instalaciones públicas y privadas crea cadenas de valor nacionales, pero también concentra riesgos tecnológicos, ambientales, laborales y territoriales (Pemex, 2026a, 2026b).

Las medidas recientes para rehabilitar y ampliar la producción petroquímica refuerzan la importancia económica del corredor. Los proyectos en Cangrejera, Morelos y Cosoleacaque incluyen la rehabilitación de plantas, servicios auxiliares, almacenamiento e infraestructura asociada. Una mayor actividad implica demandas adicionales de agua, energía, vapor y tratamiento; por ello, la modernización productiva debe acompañarse de una transformación equivalente de la gestión ambiental (Pemex, 2026a, 2026b).

El agua interviene en todo el proceso de refinación y producción petroquímica. Se utiliza en generación de vapor, torres de enfriamiento, lavado

de gases, limpieza de equipos, preparación de soluciones, control de temperatura, desmineralización, sistemas contra incendios, saneamiento y mantenimiento. La continuidad productiva depende no solo del volumen disponible, sino también de la calidad, presión, temperatura y confiabilidad del suministro (Guo et al., 2024; Mansour et al., 2024).

Los efluentes pueden contener hidrocarburos libres y emulsionados, aceites, grasas, fenoles, sulfuros, amoníaco, sólidos, sales, compuestos orgánicos volátiles, metales y sustancias empleadas en los procesos. Su concentración y composición varían según el tipo de instalación, las materias primas, las unidades productivas, la separación de drenajes y las prácticas de limpieza y mantenimiento (Guo et al., 2024; Mansour et al., 2024).

Los efluentes petroquímicos son más complejos que las aguas residuales domésticas. Los hidrocarburos pueden presentarse como fase libre, gotas dispersas, emulsiones estables o compuestos disueltos; ciertas sustancias inhiben los procesos biológicos y las variaciones de caudal y composición pueden desestabilizar las plantas. Por ello se requieren caracterización continua y trenes integrados de pretratamiento, tratamiento biológico, procesos fisicoquímicos y tecnologías avanzadas (Guo et al., 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

La región presenta una paradoja hídrica. La información oficial reporta disponibilidad media anual positiva en el acuífero Costera de Coatzacoalcos y escurrimientos superficiales importantes; sin embargo, los problemas de calidad, infraestructura, distribución y exposición a inundaciones impiden equiparar disponibilidad física con seguridad hídrica para la población y las actividades productivas (Comisión Nacional del Agua [Conagua], s. f.; Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

La diferencia entre presencia física y acceso seguro se observa en los proyectos de abastecimiento urbano. En diciembre de 2025, la Conagua informó sobre el desarrollo del acueducto de Coatzacoalcos, destinado a conducir aproximadamente 1 200 litros por segundo desde el embalse La Cangrejera. La obra, que incluye potabilización, bombeo e interconexiones, muestra que disponer de fuentes regionales no sustituye la inversión, el tratamiento ni la continuidad operativa del servicio (Conagua, 2025).

La planeación industrial debe reconocer la prioridad del uso humano y doméstico. La existencia de escurrimientos o disponibilidad administrativa

no autoriza una expansión indefinida de la demanda productiva. La sostenibilidad depende de que el abastecimiento industrial no reduzca la continuidad urbana, deteriore los ecosistemas ni transfiera costos de tratamiento a la población.

A los desafíos de abastecimiento se agrega un legado de contaminación. La parte baja del río Coatzacoalcos ha recibido históricamente aportes urbanos, agropecuarios e industriales. Se han documentado hidrocarburos, contaminantes orgánicos persistentes y elementos potencialmente tóxicos en agua, sedimentos y organismos, aunque su distribución y riesgo varían según el sitio, el contaminante y las condiciones hidrodinámicas (Oliveros-Rubio y Ponce-Vélez, 2025; Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

Una evaluación de 2026 identificó en sedimentos de la cuenca baja concentraciones de cromo, cobre, plomo y zinc superiores a determinados valores de referencia. Aunque los índices integrados indicaron en general un riesgo ecológico bajo, algunos elementos pueden superar ocasionalmente umbrales de preocupación. Los resultados reflejan la interacción de fuentes naturales, sedimentos finos, materia orgánica y presiones antropogénicas, por lo que se requiere monitoreo específico por contaminante y sitio (Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

Los estudios recientes sobre hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos del sur del Golfo de México relacionan su presencia con actividad petrolera, combustión, derrames y descargas terrestres. Aunque las concentraciones y riesgos no son uniformes, su persistencia y capacidad de acumulación justifican medidas preventivas y vigilancia de largo plazo (Oliveros-Rubio y Ponce-Vélez, 2025).

La región también está expuesta a lluvias intensas, anegamientos, mareas, huracanes y cambios costeros. Estos fenómenos pueden rebasar los drenajes, movilizar sedimentos contaminados, interrumpir las plantas de tratamiento y mezclar aguas pluviales con aguas residuales sanitarias o industriales. La resiliencia hídrica petroquímica debe gestionar tanto la insuficiencia y el deterioro de la calidad como los excedentes extremos (Gobierno del Estado de Veracruz, 2025; Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

La práctica convencional ha consistido en ampliar el suministro, tratar al final del proceso y descargar cuando se cumplen determinados límites. Este modelo lineal resulta insuficiente ante grandes volúmenes, contami-

nantes complejos y restricciones territoriales. La economía circular propone reducir la extracción, mantener el agua en uso, recuperar componentes y crear intercambios entre empresas (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Morseletto et al., 2022).

En una refinería o complejo petroquímico, la circularidad puede incluir recuperación de condensados, recirculación de agua de enfriamiento, reducción de purgas, segregación de drenajes, tratamiento para producir agua de alimentación de calderas, recuperación de hidrocarburos y producto perdido, aprovechamiento de calor y manejo diferenciado de lodos. A escala territorial puede incorporar redes de agua regenerada, plantas compartidas, intercambio de vapor y servicios comunes de monitoreo y respuesta ante emergencias (Mirata et al., 2024; Ramin et al., 2024).

La circularidad no equivale a descarga cero ni implica que todas las corrientes puedan reutilizarse. Los tratamientos avanzados consumen energía y reactivos, requieren reemplazo de membranas y generan lodos o concentrados. Un proyecto puede reducir el volumen descargado y, al mismo tiempo, aumentar emisiones o residuos peligrosos. La evaluación debe abarcar el ciclo de vida completo y no limitarse al porcentaje de agua reciclada (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Guo et al., 2024).

El objetivo del capítulo es analizar los fundamentos, el potencial y los requisitos de la gestión circular del agua en los corredores petroquímicos de Veracruz. La pregunta orientadora es la siguiente: ¿qué transformaciones tecnológicas, empresariales e institucionales se requieren para reducir la extracción, controlar las descargas e impulsar intercambios circulares sin trasladar riesgos a las comunidades?

La premisa central es que la circularidad no debe definirse únicamente por el volumen recirculado dentro de una instalación. Una estrategia genera valor territorial cuando reduce de manera verificable la captación de agua convencional, disminuye las cargas contaminantes, gestiona adecuadamente los residuos del tratamiento y mejora la seguridad hídrica regional.

Aproximación teórica y conceptual

La gestión hídrica industrial comprende las decisiones sobre abastecimiento, uso, tratamiento, recirculación, descarga y respuesta ante contingencias. En una instalación petroquímica, estas funciones se relacionan con la seguridad de los procesos, la continuidad productiva, los costos energéticos, el cumplimiento ambiental y la relación con las comunidades (Guo et al., 2024; Mansour et al., 2024).

Riesgo hídrico industrial

El riesgo hídrico industrial puede clasificarse en físico, operativo, regulatorio, financiero, reputacional y territorial. El riesgo físico se relaciona con la cantidad y calidad del suministro; el operativo, con fallas de bombas, calderas, torres, tuberías o plantas de tratamiento; y el regulatorio, con permisos, límites de descarga y sanciones. Los incidentes y la contaminación también generan costos, controversias y pérdida de legitimidad.

El riesgo territorial trasciende la instalación. Una planta puede contar con infraestructura propia y seguir expuesta a la degradación del río, los conflictos por el abastecimiento urbano, las inundaciones o las fallas de proveedores. La seguridad empresarial depende del sistema compartido y no solo del volumen almacenado dentro del complejo.

La economía circular del agua busca transformar el proceso lineal de captación, uso, tratamiento y descarga. Propone prevenir el consumo, prolongar el uso, adecuar la calidad a cada finalidad y recuperar materiales o energía. El agua deja de ser un insumo desechable y se gestiona activamente dentro de los procesos y entre organizaciones (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Morsetletto et al., 2022).

La circularidad puede organizarse jerárquicamente: evitar consumos innecesarios; reducir la demanda mediante eficiencia; recircular dentro del proceso; reutilizar en otras operaciones; intercambiar agua entre empresas; recuperar materiales y energía; y contribuir a la regeneración de la cuenca (Morsetletto et al., 2022).

Esta jerarquía evita que el tratamiento sea la primera y única respuesta. Una instalación capaz de producir agua de alta calidad mediante membranas puede conservar fugas, purgas excesivas o sistemas de enfriamiento ineficientes. La prevención reduce el volumen que debe tratarse y los costos asociados.

La gestión circular se sustenta en balances hídricos. Deben identificarse cada fuente, calidad, flujo, uso y descarga dentro de límites operativos definidos. También debe distinguirse el agua captada de la consumida, pues una parte retorna al sistema, mientras otra se evapora, se incorpora al producto o queda retenida en residuos (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

Los balances corporativos agregados no bastan para identificar oportunidades. En refinerías y complejos petroquímicos deben medirse por separado torres, calderas, talleres, laboratorios, servicios y drenajes. Los límites contables deben evitar que el mismo volumen recirculado se contabilice varias veces.

La intensidad hídrica expresa los metros cúbicos utilizados por unidad de producción, procesamiento o venta. Es útil para comparar el desempeño, pero puede disminuir mientras aumenta la captación total por expansión productiva. Por ello debe complementarse con metas absolutas vinculadas con las condiciones de la fuente.

Otro principio es utilizar una calidad adecuada para cada propósito. Las calderas de alta presión requieren agua desmineralizada; las torres de enfriamiento admiten determinadas concentraciones de sales con control microbiológico; los enjuagues iniciales pueden usar agua de menor calidad; y los servicios sanitarios no requieren agua potable. Emplear una sola calidad para todas las operaciones aumenta costos y desperdicia recursos (Santos et al., 2023, 2024).

El uso en cascada destina primero el agua a procesos con mayores exigencias y después a actividades menos restrictivas. Los condensados pueden retornar a las calderas; ciertos enjuagues pueden reutilizarse en etapas previas; y el agua tratada puede destinarse a torres de enfriamiento, servicios o control de polvo. La secuencia debe evitar acumulaciones que dañen equipos o productos.

La segregación de corrientes es una condición técnica esencial. Las aguas pluviales limpias deben separarse de los drenajes aceitosos; las corrientes

salinas requieren tratamientos diferentes de los efluentes biodegradables; y las aguas sanitarias deben mantenerse aisladas de sustancias peligrosas. La mezcla aumenta el volumen y la complejidad del tratamiento (Guo et al., 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

En la industria petroquímica suelen distinguirse drenajes aceitosos, aguas de proceso, purgas de enfriamiento, efluentes de desmineralización, aguas sanitarias y escurrimientos pluviales. Cada corriente presenta variaciones y riesgos específicos. La segregación permite recuperar hidrocarburos, proteger los procesos biológicos y producir calidades diferenciadas para el reúso.

Los tratamientos primarios separan aceites libres, sólidos y materiales flotantes mediante separadores por gravedad, tanques de ecualización, flotación por aire disuelto, coagulación y floculación. Su desempeño depende de la estabilidad de las emulsiones, el tamaño de las gotas, la temperatura, el pH y los productos químicos empleados (Guo et al., 2024).

Los procesos biológicos degradan materia orgánica biodegradable y compuestos nitrogenados. Los lodos activados, reactores con biopelícula y sistemas anaerobios pueden ser adecuados, pero son sensibles a cargas tóxicas, variaciones bruscas y salinidad. El pretratamiento y la ecualización protegen su estabilidad (Guo et al., 2024; Mansour et al., 2024).

Los tratamientos fisicoquímicos y avanzados incluyen adsorción, oxidación, membranas, electrocoagulación y procesos híbridos. Pueden remover compuestos persistentes y producir agua para reúso, pero aumentan las exigencias de energía, reactivos, mantenimiento y gestión de concentrados (Mejía-Marchena et al., 2023).

La ósmosis inversa y la electrodiesionización pueden producir agua de alta pureza para aplicaciones industriales. La evidencia experimental muestra su viabilidad para tratar efluentes petroquímicos y generar agua desmineralizada, siempre que exista pretratamiento suficiente y control del ensuciamiento (Santos et al., 2023, 2024).

La selección tecnológica debe considerar la calidad de entrada, el uso final, la confiabilidad, el consumo energético, la disponibilidad de repuestos, las capacidades del personal y el destino de los residuos. Una alta eficiencia de remoción no garantiza sostenibilidad cuando el sistema resulta imposible de operar o mantener.

La recuperación de recursos comienza con la prevención de pérdidas de producto. Los hidrocarburos separados en origen conservan mayor valor que aquellos dispersos en grandes volúmenes de agua. La segregación mejora la recuperación y reduce la carga del tratamiento.

Los aceites y solventes recuperados requieren caracterización para determinar si pueden reintegrarse al proceso, enviarse a valorización o manejarse como residuos. Su valor depende de la pureza, el volumen, los costos de acondicionamiento y las restricciones de seguridad.

El calor puede recuperarse de condensados, corrientes calientes y sistemas de enfriamiento. Su aprovechamiento reduce el consumo energético y, potencialmente, el agua necesaria para producir vapor. Los intercambiadores deben diseñarse para evitar contaminación cruzada y mantener la confiabilidad del proceso.

La digestión anaerobia puede generar biogás a partir de cargas orgánicas biodegradables. Su aplicabilidad es menor en efluentes petroquímicos altamente tóxicos, pero puede resultar viable en corrientes auxiliares o mezcladas. La decisión depende de la biodegradabilidad, la concentración y la presencia de inhibidores.

La recuperación de nutrientes y materiales exige precaución. Los lodos pueden contener metales, hidrocarburos y compuestos persistentes que limitan su aprovechamiento. Transformar contaminación líquida en un residuo sólido sin gestión segura no constituye circularidad.

La simbiosis industrial amplía la economía circular más allá de una empresa. Consiste en crear conexiones para que el agua, la energía, los materiales, la infraestructura o los residuos de una organización tengan valor para otra. Puede reducir costos, riesgos y consumo de recursos, pero también genera dependencias y costos de coordinación (Mirata et al., 2024; Ramin et al., 2024).

En un corredor petroquímico, la simbiosis puede incluir plantas compartidas de agua regenerada, redes de vapor, recuperación de condensados, laboratorios conjuntos, almacenamiento de emergencia, tratamiento de lodos y sistemas colectivos contra incendios. La proximidad favorece estos intercambios, pero no elimina la necesidad de compatibilidad técnica.

Los beneficios empresariales incluyen menores costos de insumos y tratamiento, ingresos por subproductos, reducción de riesgos regulatorios y

acceso a infraestructura. Las contrapartidas son la inversión, la adaptación de procesos, los costos de transacción, la capacitación y la dependencia del proveedor o usuario de la corriente residual (Mirata et al., 2024).

La dependencia se convierte en riesgo cuando una empresa suspende el suministro o modifica la calidad de su corriente. Los contratos deben prever fuentes de respaldo, almacenamiento, protocolos de contingencia y procedimientos de terminación. La circularidad territorial no puede descansar en acuerdos informales capaces de comprometer la seguridad industrial.

La gobernanza circular comprende las reglas, incentivos, contratos e instituciones que coordinan los intercambios. El Estado conserva las facultades sobre concesiones, descargas, emergencias y protección ambiental. Las empresas pueden gestionar infraestructura compartida, pero no supervisarse legalmente entre sí ni establecer unilateralmente los límites aplicables.

La colaboración público-privada puede financiar redes troncales, plantas compartidas o sistemas de monitoreo cuando el proyecto genere un beneficio territorial adicional y verificable. Los recursos públicos no deben utilizarse para cubrir obligaciones de empresas solventes ni para garantizar exclusivamente su abastecimiento.

La justicia hídrica es un criterio indispensable. Las comunidades del corredor han coexistido con riesgos de acceso, calidad y contaminación. La modernización petroquímica carece de legitimidad si mantiene o incrementa esos riesgos mientras asegura agua de alta calidad para las instalaciones.

Las reglas operativas deben reconocer la prioridad del consumo humano. Los planes de contingencia deben establecer reducciones industriales y fuentes de respaldo durante sequías, episodios de contaminación o fallas de infraestructura. La población no debe asumir automáticamente el costo de mantener la producción.

La circularidad debe incorporar resiliencia frente a inundaciones. Las instalaciones deben separar el drenaje pluvial, proteger las plantas de tratamiento, asegurar sustancias peligrosas y conservar almacenamiento temporal para evitar descargas durante lluvias intensas. La restauración de humedales puede apoyar la regulación hidrológica, pero no sustituye la seguridad de los procesos.

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. El diseño permitió reunir literatura sobre tratamiento y reúso de efluentes petroquímicos, economía circular, simbiosis industrial, recuperación de recursos, evaluación de impactos en sistemas costeros y estuarinos y gobernanza territorial.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos de planeación ambiental, información de la Conagua, reportes de Pemex, normas de descarga y estudios recientes sobre sedimentos y contaminantes en la cuenca baja del río Coatzacoalcos. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2026.

La búsqueda documental empleó términos en español e inglés relacionados con aguas residuales petroquímicas, agua de refinería, reúso industrial, economía circular, simbiosis industrial, recuperación de recursos, membranas, Coatzacoalcos, Minatitlán y corredor petroquímico de Veracruz.

Los criterios de inclusión fueron relación directa con la pregunta de investigación, actualidad, procedencia académica u oficial, claridad metodológica y aplicabilidad territorial. Se excluyeron materiales promocionales sin indicadores verificables y textos que identificaban circularidad únicamente con base en menores emisiones o descargas.

El análisis se organizó en siete categorías: riesgo hídrico territorial; eficiencia y prevención; segregación y tratamiento; reúso; recuperación de materiales y energía; simbiosis y financiamiento; y gobernanza, transparencia y justicia hídrica.

Los resultados constituyen una síntesis teórica y no una evaluación del desempeño ambiental ni de la responsabilidad jurídica de empresas específicas. La falta de información pública homogénea sobre captación, consumo, recirculación, cargas contaminantes y costos por centro de trabajo limita la comparación y representa un problema de gobernanza.

Resultados

Gestión territorial del riesgo hídrico

El primer resultado es que la gestión petroquímica debe comenzar con un balance territorial. Aunque la región dispone de recursos hídricos relativamente abundantes, persisten problemas de calidad, acceso, infraestructura y variabilidad. La planeación debe integrar el río Coatzacoalcos, sus afluentes, los acuíferos, los humedales, los sistemas urbanos y la demanda industrial (Conagua, s. f.; Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

El balance debe identificar las fuentes de cada instalación, los volúmenes concesionados y efectivamente extraídos, las transferencias entre fuentes o instalaciones, los retornos y la calidad del agua. También debe incorporar las necesidades urbanas, los caudales ambientales y los escenarios de crecimiento industrial.

La disponibilidad positiva del acuífero Costera de Coatzacoalcos no debe interpretarse de manera aislada. La descarga natural cumple funciones ecosistémicas y los efectos de la extracción pueden concentrarse localmente sin reflejarse en el balance agregado. Las decisiones deben considerar la ubicación de los pozos, su interacción con humedales y la calidad del agua (Conagua, s. f.).

El nuevo acueducto de Coatzacoalcos evidencia la transformación de la infraestructura urbana. La planeación industrial debe coordinarse con estas obras para evitar competencia, conexiones improvisadas o dependencia de una fuente diseñada principalmente para la población (Conagua, 2025).

Las inversiones en rehabilitación petroquímica requieren evaluaciones hídricas paralelas. Ampliar la capacidad productiva sin confirmar el abastecimiento, el tratamiento y la disposición puede trasladar los cuellos de botella desde las unidades de proceso hacia los servicios auxiliares (Pemex, 2026a, 2026b).

Balances y eficiencia en las instalaciones

El segundo resultado es que todas las instalaciones requieren balances auditable por proceso. Los indicadores corporativos agregados no permiten evaluar por separado el desempeño hídrico de Cangrejera, Morelos, Cosoleacaque, la refinería de Minatitlán y las instalaciones privadas (Pemex, 2025).

Deben instalarse medidores en tomas, plantas de tratamiento, desmineralizadores, calderas, torres de enfriamiento, unidades de proceso y descargas. La medición permite detectar fugas y localizar oportunidades de recirculación y recuperación.

La recuperación de condensados es una alternativa prioritaria. El condensado conserva energía y puede reutilizarse cuando se controlan los hidrocarburos, la corrosión y la contaminación accidental. Su recuperación reduce el consumo de agua, energía y productos químicos.

Las torres de enfriamiento ofrecen otra oportunidad. Aumentar de manera controlada los ciclos de concentración reduce el agua de reposición y las purgas, pero requiere gestionar sales, microorganismos, corrosión e incrustaciones. Una meta excesiva puede dañar equipos y aumentar el uso de biocidas.

Antes de incorporar tecnologías complejas deben atenderse la detección y reparación de fugas. Las pérdidas continuas pueden originarse en redes envejecidas, válvulas, trampas de vapor e intercambiadores de calor y permanecer menos visibles que una descarga final.

Los balances deben incluir metas absolutas. La intensidad por tonelada puede mejorar mientras la captación total aumenta con la producción. El límite territorial debe definirse mediante el volumen total extraído y consumido, no solo mediante la eficiencia relativa.

Separación y tratamiento de corrientes

El tercer resultado es que la segregación de drenajes constituye la base técnica de la circularidad. Si una instalación mezcla aguas pluviales, sanitarias, aceitosas, salinas y de proceso, pierde la posibilidad de tratarlas y reutilizarlas de manera eficiente.

Las aguas pluviales de áreas limpias pueden gestionarse de forma independiente y aprovecharse cuando su calidad lo permite. El escurrimiento de zonas de proceso puede arrastrar hidrocarburos o sustancias peligrosas y debe contenerse y tratarse.

Los drenajes aceitosos deben dirigirse a sistemas de recuperación. Los hidrocarburos libres pueden separarse por gravedad, mientras las emulsiones pueden requerir flotación, coagulación u otros tratamientos. La recuperación inicial reduce la carga de los procesos posteriores (Guo et al., 2024).

Las corrientes de alta salinidad, como rechazos de membranas y purgas, deben separarse de los efluentes biodegradables. La mezcla puede inhibir los procesos biológicos, incrementar el ensuciamiento de membranas y dificultar la gestión de concentrados.

Las aguas sanitarias pueden tratarse biológicamente y reutilizarse en servicios o áreas verdes con los controles correspondientes. Mezclarlas con efluentes tóxicos elimina esa posibilidad y aumenta el riesgo operativo.

Cada instalación debe elaborar una matriz que relacione corriente, contaminantes, tratamiento, calidad alcanzable y usos posibles. Esta herramienta evita plantas únicas sobredimensionadas y ayuda a priorizar tratamientos descentralizados.

Reúso para enfriamiento y producción de vapor

El cuarto resultado es iniciar el reúso en aplicaciones de alta demanda y requisitos controlables. El agua tratada puede utilizarse en torres de enfriamiento, servicios sanitarios, lavado de patios y control de polvo antes de considerar aplicaciones más exigentes como la alimentación de calderas.

En torres de enfriamiento deben controlarse sólidos, dureza, alcalinidad, cloruros, sílice, nutrientes y microorganismos. El reúso reduce el consumo de agua dulce, pero genera purgas concentradas que también requieren tratamiento y disposición adecuada.

La generación de vapor representa una oportunidad de alto valor. La ultrafiltración, la ósmosis inversa y la electrodesionización pueden producir agua desmineralizada a partir de efluentes terciarios. La evidencia experi-

mental demuestra que estos trenes pueden alcanzar la calidad requerida y reducir la dependencia de agua dulce (Santos et al., 2023, 2024).

El efluente debe ser estable y el sistema debe controlar ensuciamiento, consumo energético, reemplazo de membranas y concentrados. Producir agua de alta calidad no justifica una tecnología si sus cargas residuales o su energía generan impactos mayores que los evitados.

Los sistemas de reúso necesitan fuentes de respaldo para enfrentar fallas. Esos respaldos no deben convertirse en una vía para ampliar indefinidamente la producción con agua convencional. Los volúmenes utilizados deben registrarse y revisarse.

El indicador principal es el volumen de agua dulce efectivamente sustituido. Recircular el mismo caudal varias veces aumenta el porcentaje reportado de reúso, pero no demuestra por sí mismo una reducción de la captación.

Recuperación de hidrocarburos, materiales y energía

El quinto resultado es que las plantas de tratamiento pueden convertirse en instalaciones de recuperación de recursos. Los hidrocarburos separados, ciertos solventes, el calor y el agua conservan valor cuando su calidad es suficiente y existe una ruta de aprovechamiento segura.

La recuperación de aceites debe comenzar en corrientes concentradas. Estas conservan mayor valor y son más fáciles de separar que los hidrocarburos dispersos en grandes volúmenes. La segregación reduce costos y riesgos.

Los lodos aceitosos requieren caracterización. Según su composición pueden someterse a separación, estabilización, coprocesamiento o tratamiento biológico. No deben clasificarse automáticamente como recursos cuando contienen contaminantes que impiden su aprovechamiento.

Los condensados y las corrientes calientes pueden transferir calor a otros procesos. Esta recuperación reduce el consumo de energía y vapor, pero requiere evaluar corrosión, ensuciamiento y presencia de contaminantes.

Los procesos biológicos generan lodos que deben gestionarse. Su valorización solo es viable después de caracterizar metales, hidrocarburos y residuos peligrosos. De otro modo, su uso puede trasladar la contaminación

al suelo o a otros medios. El balance circular debe incluir adsorbentes usados, membranas y otros consumibles. Una tecnología que aísla contaminantes pero genera residuos sin una ruta segura solo desplaza el problema.

Simbiosis industrial en los corredores petroquímicos

El sexto resultado es que la concentración industrial ofrece condiciones para desarrollar simbiosis. Las empresas están próximas, utilizan servicios semejantes y pueden compartir infraestructura de tratamiento, redes de agua regenerada, vapor, laboratorios y sistemas de respuesta ante emergencias (Mirata et al., 2024; Ramin et al., 2024).

Una red regional de agua regenerada podría recibir efluentes previamente tratados, aplicar un tratamiento avanzado central y distribuir diferentes calidades. Las instalaciones con requisitos más estrictos realizarían un acondicionamiento adicional en sitio.

La infraestructura común debe combinar pretratamiento obligatorio en cada instalación con tratamiento centralizado. Enviar corrientes altamente tóxicas sin acondicionar puede afectar la planta y a todos sus usuarios.

Las tarifas deben considerar el volumen, la calidad y la carga contaminante. Cobrar únicamente por metro cúbico permite descargar corrientes complejas sin reflejar el mayor costo de tratamiento.

Los contratos deben definir estándares de entrada y salida, medición, continuidad, propiedad de residuos, respuesta ante incidentes, expansión y terminación. La interdependencia requiere reglas para el retiro de una empresa o la modificación de sus procesos.

Las instalaciones de gran tamaño pueden actuar como usuarios ancla con demanda continua. Sin embargo, la infraestructura no debe diseñarse únicamente para un actor dominante. Las empresas medianas y pequeñas necesitan condiciones de acceso no discriminatorias.

La simbiosis puede incluir laboratorios y monitoreo compartidos, pero la verificación regulatoria debe mantenerse independiente. Los sistemas empresariales aportan información operativa, pero no sustituyen la inspección gubernamental.

Financiamiento público y colaboración público-privada

El séptimo resultado es que la transición circular requiere inversión en medición, tuberías, almacenamiento, tratamiento y automatización.

Los proyectos pueden financiarse con recursos empresariales, créditos, contratos de desempeño, fondos públicos y esquemas de colaboración público-privada.

Cada empresa debe cubrir las inversiones necesarias para cumplir la normativa y atender sus impactos. Los recursos públicos se justifican en infraestructura compartida, investigación, monitoreo, restauración y proyectos con beneficios regionales verificables.

Los contratos de desempeño pueden vincular una parte del pago con la reducción de captaciones, la calidad producida y la disponibilidad de la planta, verificadas de manera independiente. Este mecanismo distribuye el riesgo tecnológico y desincentiva la compra de equipos que después no operan.

Una colaboración público-privada no elimina los costos públicos. Las tarifas, pagos o contratos recuperan la inversión privada. Deben compararse el ciclo de vida, las garantías, los riesgos fiscales, el mantenimiento y las posibles renegociaciones.

Las funciones de regulación, inspección y sanción deben permanecer en manos de la autoridad. Participar en infraestructura compartida no puede otorgar ventajas en permisos, límites de descarga o inspecciones.

Deben publicarse la inversión, los plazos, las tarifas, las garantías, las penalizaciones y la propiedad de los activos. La confidencialidad comercial no puede ocultar responsabilidades fiscales o ambientales.

Monitoreo ambiental y trazabilidad

El octavo resultado es integrar el monitoreo industrial, territorial y comunitario. La calidad de las descargas debe relacionarse con los datos del río, los sedimentos, los humedales y las zonas costeras. Deben monitorearse aguas arriba y aguas abajo el caudal, las demandas química y bioquímica de

oxígeno, los aceites y grasas, los sólidos, la toxicidad y los parámetros específicos de cada proceso. La NOM-001-SEMARNAT-2021 constituye una referencia para descargas en cuerpos receptores nacionales, pero la caracterización puede requerir compuestos adicionales según la actividad (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

La trazabilidad exige atribuir cada flujo y registrar los pares origen-destino. Sin medidores y muestreo en cada conexión, los colectores compartidos dificultan identificar al responsable de una alteración.

Los sensores en línea permiten detectar cambios en pH, conductividad, turbidez, temperatura y materia orgánica. No sustituyen los análisis de laboratorio para hidrocarburos, metales y compuestos específicos.

El monitoreo del río debe considerar lluvias y sedimentos. La dilución puede reducir temporalmente las concentraciones en el agua, mientras los contaminantes se acumulan o movilizan en sedimentos. Analizar solo la columna de agua puede ocultar fuentes crónicas de contaminación (Ontiveros-Cuadras et al., 2026).

Los datos deben publicarse con métodos, fechas, ubicaciones y límites de detección. Los tableros facilitan la consulta, pero deben permitir el acceso a series históricas y resultados primarios.

Las universidades y centros de investigación pueden apoyar la validación, modelación e innovación tecnológica. Su participación requiere independencia, declaración de conflictos de interés y libertad para publicar resultados desfavorables.

Justicia hídrica y prevención de emergencias

El noveno resultado es que la circularidad debe generar beneficios para las comunidades. Los ahorros empresariales tienen que acompañarse de menores extracciones y descargas, mayor continuidad de los servicios, reducción de riesgos y mejora ambiental.

Deben divulgarse las fuentes monitoreadas, los compuestos presentes en lodos y los protocolos de emergencia. La información sobre incidentes debe comunicarse oportunamente y no limitarse a boletines posteriores. Las comunidades cercanas pueden reportar olores, cambios de color, espu-

ma, mortandad de peces y variaciones en pozos o humedales. Estas observaciones no sustituyen el análisis técnico, pero pueden activar inspecciones.

Se requieren mecanismos de queja accesibles e independientes. Las empresas pueden mantener canales internos, pero la población debe conservar recursos ante las autoridades ambientales, sanitarias, laborales y de protección civil.

Los protocolos de sequía deben establecer prioridades, reducciones escalonadas y fuentes alternativas. La continuidad de instalaciones estratégicas no puede colocarse por encima del derecho humano al agua.

Los protocolos de inundación deben proteger tanques, tuberías y plantas de tratamiento. Los sistemas requieren energía de respaldo y almacenamiento temporal para evitar descargas durante fallas.

Las empresas pueden aportar equipos, laboratorios, transporte y personal en emergencias. Estos acuerdos deben establecerse con anticipación y no desplazan la obligación de reparar los daños atribuibles a cada empresa.

Modelo circular de gestión hídrica

A partir del análisis se propone un modelo integrado con ocho componentes: balance territorial, medición empresarial, prevención, segregación de corrientes, tratamiento y reúso, recuperación de recursos, simbiosis industrial y gobernanza transparente.

El balance territorial define disponibilidad, calidad, usos y vulnerabilidad. La medición empresarial identifica los flujos y establece la línea base. La prevención evita consumos y contaminantes antes del tratamiento.

La segregación preserva el valor de las corrientes y protege las plantas. El tratamiento produce calidades adecuadas para el reúso. Cuando es seguro y viable, la recuperación aprovecha hidrocarburos, calor y materiales.

La simbiosis permite compartir infraestructura y servicios. La gobernanza define funciones, contratos, supervisión, transparencia y salvaguardas para las comunidades.

El modelo opera en tres escalas: la instalación, donde se controlan procesos y corrientes; el corredor, donde se desarrollan intercambios e infraestructura; y la cuenca, donde se verifica que las medidas reduzcan la presión

total y mejoren la calidad ambiental. Los indicadores deben incluir extracción total, intensidad hídrica, uso consuntivo, condensados recuperados, agua regenerada utilizada, agua convencional sustituida, carga contaminante, energía del tratamiento, residuos generados, incidentes, continuidad operativa y evolución de la calidad de las fuentes.

Los resultados deben evaluarse durante varios años. Los equipos se degradan, las condiciones productivas cambian y los intercambios pueden interrumpirse. La gobernanza debe prever mantenimiento, renovación tecnológica, aprendizaje y adaptación.

La preservación del desempeño requiere programas de mantenimiento preventivo, reposición de activos, capacitación y revisión periódica de metas. La circularidad solo es sostenible cuando los sistemas continúan operando y mejoran con la experiencia.

Conclusiones

Las actividades petroquímicas del sur de Veracruz tienen importancia económica nacional, pero también demandan grandes volúmenes de agua, generan efluentes complejos y conllevan riesgos ambientales elevados. La modernización productiva debe acompañarse de cambios equivalentes en abastecimiento, procesos, tratamiento y sistemas de control.

La presencia del río Coatzacoalcos y la disponibilidad del acuífero costero no eliminan la inseguridad hídrica. El acceso efectivo depende de la calidad, la infraestructura, la continuidad, las inundaciones y la distribución. La gestión industrial debe reconocer estos límites y la prioridad del consumo humano.

La contaminación tiene fuentes industriales, urbanas, agrícolas y naturales. Esta diversidad no diluye la responsabilidad empresarial. Cada instalación debe medir, prevenir, tratar y reportar los impactos bajo su control.

La economía circular no comienza en la planta de tratamiento. Primero deben atenderse la medición, el mantenimiento, la eficiencia, la recuperación de condensados y la separación de corrientes. El tratamiento avanzado procede después de reducir la generación y preservar la calidad de los flujos.

El reúso en enfriamiento, calderas y servicios puede apoyarse en tecnologías biológicas, fisicoquímicas, de oxidación y de membrana. Su viabilidad depende de la estabilidad del afluente, la energía, el mantenimiento y la gestión de lodos y concentrados.

El reúso debe medirse mediante la sustitución de agua convencional. Los porcentajes de recirculación no bastan y la captación total puede aumentar con la producción. Las metas relativas necesitan límites absolutos.

La recuperación de hidrocarburos, calor y materiales puede reducir costos y residuos, pero exige calidad, seguridad y mercados. Asignar un uso potencial a una corriente no la convierte automáticamente en recurso.

La proximidad de los complejos favorece la simbiosis industrial y las economías de escala de las redes compartidas. Esa interdependencia exige contratos, estándares, fuentes de respaldo y supervisión.

La colaboración público-privada puede financiar infraestructura compartida, pero no sustituir las inversiones individuales de cumplimiento. La rectoría pública debe conservar la regulación, la inspección y la protección del derecho humano al agua.

Los contaminantes y las mejoras deben monitorearse de manera independiente. Los datos empresariales deben integrarse, con métodos transparentes, a la información del río, los sedimentos, los humedales y las comunidades.

La resiliencia exige anticipar sequías, interrupciones, contaminación e inundaciones. Los protocolos deben definir prioridades, reducciones temporales, energía y fuentes de respaldo, almacenamiento y comunicación pública.

El modelo conecta la instalación, el corredor y la cuenca. Su desempeño no debe evaluarse solo por el volumen que atraviesa las plantas, sino por la reducción verificable de extracciones y contaminantes, la mejora de los ecosistemas y el fortalecimiento de la seguridad hídrica regional.

La competitividad futura del sector petroquímico de Veracruz dependerá de crear valor con menos agua convencional y menores impactos. La economía circular ofrece herramientas para lograrlo cuando se combina con responsabilidad, transparencia, innovación y justicia hídrica.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). Aguas subterráneas: Acuíferos del estado de Veracruz. Gobierno de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/veracruz/veracruz.html>
- Comisión Nacional del Agua. (2025, 23 de diciembre). Conagua avanza en el desarrollo del acueducto Coatzacoalcos, en Veracruz. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/conagua-avanza-en-el-desarrollo-del-acueducto-coatzacoalcos-en-veracruz>
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Gobierno del Estado de Veracruz. (2025). Programa Veracruzano de Medio Ambiente, Sustentabilidad y Gestión Climática 2025-2030. Secretaría de Medio Ambiente. <https://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/programas-estatales-de-medio-ambiente/>
- Guo, H., Qin, Q., Hu, M., Chang, J. S., y Lee, D. J. (2024). Treatment of refinery wastewater: Current status and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112508. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112508>
- Mansour, M. S. M., Abdel-Shafy, H. I., y Ibrahim, A. M. (2024). Petroleum wastewater: Environmental protection, treatment, and safe reuse: An overview. *Journal of Environmental Management*, 351, 119827. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119827>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C., Arismendy-Montes, L., y Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: Advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2198147>
- Mirata, M., Lindfors, A., y Kambanou, M. L. (2024). A business value framework for industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 28(6), 1541-1553. <https://doi.org/10.1111/jiec.13545>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Olivares-Rubio, H. F., y Ponce-Vélez, G. (2025). Polycyclic aromatic hydrocarbons during the 21st century in Southern Gulf of Mexico, a prominent petroleum area: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 210, 117343. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117343>

- Ontiveros-Cuadras, J. F., Olivares-Rubio, H. F., Carnero-Bravo, V., Elías-García, V. G., Salazar-Remigio, L., Santiago-Pérez, S., Hernández-Pulido, F. S., y Ponce-Vélez, G. (2026). Assessment of potentially toxic elements in surface sediments along the lower Coatzacoalcos River basin, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 48, 129. <https://doi.org/10.1007/s10653-026-03005-1>
- Petróleos Mexicanos. (2025). Informe de sostenibilidad 2024. https://www.pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/
- Petróleos Mexicanos. (2026a, 29 de abril). Pemex conmemora 45 años del Complejo Petroquímico Cangrejera, como pilar de la petroquímica nacional. https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_regionales/Paginas/2026-13_coatzacoalcos.aspx
- Petróleos Mexicanos. (2026b, 26 de febrero). Incrementa Pemex 21 por ciento producción de fertilizantes en 2025. https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_nacionales/Paginas/2026_13_nacional.aspx
- Ramin, E., Faria, L., Gargalo, C. L., Ramin, P., Flores-Alsina, X., Andersen, M. M., y Germaey, K. V. (2024). Water innovation in industrial symbiosis: A global review. *Journal of Environmental Management*, 349, 119578. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119578>
- Santos, A. B., Giacobbo, A., Rodrigues, M. A. S., y Bernardes, A. M. (2023). Integrated membrane process (UF/RO/EDI) for treating a petrochemical wastewater to obtain ultrapure water for industrial reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.001>
- Santos, A. B., Giacobbo, A., Rodrigues, M. A. S., y Bernardes, A. M. (2024). Electrodeionization for wastewater reuse in petrochemical plants. *Water*, 16(3), 401. <https://doi.org/10.3390/w16030401>

10. Quintana Roo: turismo, saneamiento y alianzas público-privadas para la protección del agua*



CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.10>

Resumen

Quintana Roo alberga algunos de los principales destinos turísticos de México, pero su crecimiento depende de un acuífero kárstico altamente permeable y vulnerable a la contaminación. La expansión urbana y hotelera, la migración, la población flotante y la cobertura desigual de alcantarillado y tratamiento incrementan la presión hídrica y amenazan los ecosistemas costeros. El objetivo del capítulo es analizar, mediante investigación teórica y documental, cómo pueden articularse el turismo, el saneamiento y las alianzas público-privadas para proteger el agua. La revisión integra aportes sobre seguridad hídrica, reúso, economía circular, tratamiento descentralizado, asignación contractual de riesgos y gobernanza ambiental. Los resultados muestran que el crecimiento turístico debe condicionarse a la capacidad efectiva de abastecimiento, recolección, tratamiento y monitoreo del acuífero. Se propone un modelo que vincula responsabilidad empresarial, planeación territorial, financiamiento basado en desempeño, transparencia y participación social. Las alianzas pueden movilizar inversión y capacidades técnicas, pero deben conservar la rectoría pública, proteger el derecho humano al agua y demostrar reducciones verificables de extracciones y cargas contaminantes.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252> ; Scopus ID: 57209292143 ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

Palabras clave: *turismo, saneamiento, alianzas público-privadas, aguas subterráneas.*

Introducción

Quintana Roo se ha consolidado como uno de los principales destinos turísticos de México. La oferta de alojamiento, recreación, restaurantes y comercio se concentra en Cancún, la Riviera Maya, Tulum, Cozumel, Isla Mujeres, Puerto Morelos, Bacalar y Mahahual, entre otros destinos vinculados con el turismo nacional e internacional. Esta especialización genera empleo y cadenas de suministro en alimentos, transporte, construcción, lavandería, entretenimiento y servicios ambientales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

El crecimiento turístico exige infraestructura. Los destinos requieren planeación territorial y servicios de agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y drenaje pluvial, además de energía, movilidad y gestión de residuos. La demanda no depende solo de la población residente: los turistas, trabajadores temporales y proyectos en construcción generan variaciones estacionales y espaciales que deben incorporarse a la planeación (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

El turismo consume agua en habitaciones, restaurantes, cocinas, lavanderías, piscinas, spas, sistemas de enfriamiento, servicios sanitarios y riego de jardines. Las necesidades varían según la categoría, el tamaño, la ocupación, el diseño, la ubicación y las prácticas de gestión. Los establecimientos con grandes áreas verdes, múltiples piscinas y servicios intensivos pueden registrar consumos por huésped superiores a los de la población residente, aunque la diversidad del sector impide establecer un único valor representativo (Gössling et al., 2012; Silva, 2023a).

Los problemas hídricos de Quintana Roo están estrechamente relacionados con la geología de la península de Yucatán. El subsuelo está formado por rocas carbonatadas permeables, fracturas, conductos, cuevas y cenotes. Ante la escasez de cauces superficiales permanentes, el agua subterránea

constituye la principal fuente de abastecimiento y también recibe infiltraciones provenientes de la superficie (Bauer-Gottwein et al., 2011).

El acuífero kárstico posee gran capacidad de almacenamiento, pero también una elevada vulnerabilidad. El agua se desplaza rápidamente por conductos y fracturas, mientras la filtración y degradación naturales varían según la estructura del subsuelo. Las descargas inadecuadas, fosas sépticas, fugas de alcantarillado, lixiviados y pozos de absorción pueden introducir microorganismos, nutrientes y sustancias químicas que después alcanzan cenotes, lagunas, humedales o zonas costeras (Bauer-Gottwein et al., 2011; Khan et al., 2024).

La disponibilidad administrativa del acuífero no implica ausencia de riesgos. Los balances regionales agregados pueden ocultar sobrebombeo local, intrusión salina, deterioro de la calidad o competencia entre usos. Además del volumen, deben considerarse la ubicación y profundidad de los pozos, su proximidad a descargas y la conectividad de los flujos subterráneos hacia la costa (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024).

El abastecimiento y el saneamiento están directamente vinculados. Cada aumento del agua distribuida genera, después del consumo y las pérdidas, un incremento de las aguas residuales. El crecimiento hotelero, residencial y comercial sin una ampliación equivalente de recolección, tratamiento y disposición convierte el desarrollo económico en una amenaza para el acuífero y los ecosistemas costeros (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Silva, 2023b).

El saneamiento presenta desafíos distintos en zonas urbanas densas y desarrollos dispersos. Los destinos consolidados requieren ampliar colectores, cárcamos, plantas y redes de reúso; las localidades pequeñas, islas y desarrollos alejados pueden depender de sistemas descentralizados. En ambos casos se necesitan operación, mantenimiento, energía, personal y gestión adecuada de lodos (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo [CAPA], 2024; Silva, 2023a).

La instalación de una planta no garantiza el saneamiento. Puede operar por debajo de su capacidad, recibir caudales superiores a su diseño, carecer de mantenimiento o descargar un efluente inadecuado para el medio receptor. Además, hoteles, viviendas y comercios pueden permanecer desconectados de la red y utilizar sistemas aislados de confiabilidad limitada (Mejía-Marchena et al., 2023; Silva, 2023a).

Las aguas residuales turísticas contienen materia orgánica, grasas, detergentes y microorganismos. Los hospitales, lavanderías, campos de golf, embarcaciones y otras actividades complementarias pueden aportar fármacos, biocidas, sales y diversos compuestos. Los tratamientos convencionales eliminan una parte importante de la contaminación, pero no todos los contaminantes emergentes (Khan et al., 2024).

El nitrógeno y el fósforo son especialmente relevantes en los sistemas costeros. Al llegar a lagunas, humedales y arrecifes pueden favorecer desequilibrios ecológicos y eutrofización. La protección del acuífero debe abarcar microorganismos, materia orgánica, nutrientes y la conectividad entre el subsuelo y el mar (Bauer-Gottwein et al., 2011; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2024).

El turismo depende directamente de la calidad ambiental. Las playas, cenotes, arrecifes, manglares y lagunas son atractivos y proporcionan protección costera, paisaje, recreación y biodiversidad. La contaminación deteriora la experiencia turística, incrementa los costos de tratamiento, afecta la salud y reduce la competitividad. Por ello, el saneamiento debe considerarse una inversión productiva y no solo una obligación ambiental (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; UNESCO, 2024).

Esta interdependencia impone responsabilidades a las empresas turísticas. Hoteles, desarrolladores, restaurantes, parques, marinas y proveedores deben gestionar eficientemente el agua, conectar sus descargas a sistemas adecuados y financiar la prevención de impactos. La responsabilidad no termina en el límite del establecimiento, pues las cadenas de suministro y la expansión inmobiliaria también afectan al territorio (Gössling et al., 2012; Morsetto et al., 2022).

Las autoridades públicas conservan la responsabilidad de planear, regular y supervisar, así como de garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento. La participación empresarial puede aportar inversión, tecnología y capacidad operativa, pero no sustituir las funciones públicas ni permitir que los intereses turísticos definan unilateralmente las prioridades de los servicios (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Las brechas de infraestructura han abierto espacios para concesiones, contratos de operación, construcción de plantas, prestación de servicios y desarrollos con sistemas propios. Estos arreglos forman un continuo de

alianzas público-privadas con diferencias de propiedad, duración, financiamiento, asignación de riesgos y mecanismos de pago (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Una alianza puede permitir que un operador especializado diseñe, financie, construya u opere activos de abastecimiento y saneamiento. También puede estructurar compras de agua regenerada, plantas compartidas para corredores turísticos o contratos de desempeño para reducir fugas y consumo. Su pertinencia depende del valor público generado, no de la mera movilización de recursos fuera del presupuesto inmediato (Georgiou et al., 2023; Global Infrastructure Hub, 2020).

El capítulo analiza las condiciones tecnológicas, económicas, contractuales, ambientales y sociales necesarias para articular el turismo, el saneamiento y las alianzas público-privadas en Quintana Roo. La pregunta guía es la siguiente: ¿cómo puede organizarse la participación empresarial y la inversión privada para ampliar el saneamiento y proteger el acuífero sin trasladar costos y riesgos a la población y los ecosistemas?

La premisa central es que una alianza no puede evaluarse únicamente por la infraestructura construida o el volumen tratado. Deben demostrarse la conexión efectiva de los usuarios, la operación permanente de las plantas, la reducción de extracciones y descargas, la protección del acuífero y la distribución territorial de los beneficios.

Aproximación teórica y conceptual

La seguridad hídrica es la capacidad de una sociedad para disponer de agua segura y suficiente, proteger la salud y los medios de vida, conservar los ecosistemas y reducir la vulnerabilidad ante sequías, inundaciones y contaminación. Comprende disponibilidad, acceso, continuidad, asequibilidad, calidad y resiliencia de los sistemas (UNESCO, 2024).

La seguridad hídrica posee una dimensión territorial y otra empresarial. La primera se refiere a la capacidad de los sistemas públicos y ambientales para atender a residentes, trabajadores, turistas y ecosistemas; la segunda, a la continuidad requerida por los establecimientos. Ambas están vinculadas: una empresa puede contar con almacenamiento propio y seguir expuesta

si la fuente regional o el saneamiento se deterioran (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

La gobernanza del agua comprende las reglas, instituciones, actores y procesos mediante los cuales se decide sobre abastecimiento, saneamiento, calidad, tarifas e infraestructura. La participación de empresas, operadores, desarrolladores y organizaciones sociales no elimina la supervisión pública. Las autoridades deben definir prioridades, monitorear la calidad, sancionar incumplimientos y garantizar un acceso equitativo (Lima et al., 2021).

El turismo plantea un problema distributivo. Las zonas con mayor capacidad económica pueden financiar pozos, cisternas y sistemas de respaldo, mientras los barrios y localidades con menor infraestructura enfrentan interrupciones, drenajes deficientes o saneamiento insuficiente. La seguridad privada del sector turístico no debe construirse a costa de una mayor vulnerabilidad pública (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

La responsabilidad empresarial comienza con el cumplimiento normativo y se extiende a prevención, eficiencia, información, inversión y reparación. Los establecimientos deben medir su uso, corregir fugas, tratar adecuadamente sus efluentes y contribuir a la protección de las fuentes compartidas. Los programas voluntarios no compensan incumplimientos ni sustituyen la conexión a los sistemas correspondientes (Morseletto et al., 2022; Silva, 2023a).

La jerarquía de gestión comienza con la prevención del consumo. Antes de buscar nuevas extracciones, desalación o abastecimientos externos, los hoteles deben revisar tuberías, edificios, equipos, limpieza, lavanderías, jardines y piscinas. Reducir la demanda disminuye tanto el suministro requerido como el caudal que debe tratarse (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Gössling et al., 2012).

La medición agregada del establecimiento no basta para identificar oportunidades. Se necesitan medidores en habitaciones, lavanderías, cocinas, piscinas, jardines, torres de enfriamiento y áreas comunes. Los indicadores por huésped, habitación ocupada, comida servida o superficie irrigada deben complementarse con volúmenes absolutos para evitar que el crecimiento oculte aumentos de consumo (Morseletto et al., 2022).

Los dispositivos de bajo consumo, la detección de fugas y la participación informada de los huéspedes pueden mejorar la eficiencia en habitacio-

nes. La comunicación no debe trasladar toda la responsabilidad al visitante mientras el establecimiento mantiene jardines de alta demanda, equipos ineficientes o prácticas de limpieza excesivas (Gössling et al., 2012).

Las lavanderías concentran una parte relevante del consumo hotelero. Los ahorros provienen de equipos eficientes, cargas completas, recuperación de agua de enjuague, detección de fugas y programas voluntarios de cambio de ropa de cama. La subcontratación no elimina el consumo, sino que lo desplaza; por ello debe incluirse en la evaluación de la cadena de valor (Morseletto et al., 2022).

Las áreas verdes deben emplear especies adaptadas al clima y la salinidad, riego en horarios adecuados, control de humedad y menor superficie ornamental intensiva. Sustituir vegetación nativa por especies de alta demanda aumenta el consumo y puede requerir fertilizantes que se infiltran al acuífero (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

Las piscinas y elementos acuáticos presentan pérdidas por evaporación, limpieza, fugas y retrolavado. La eficiencia incluye mantenimiento, control de niveles, cubiertas cuando sean compatibles con el uso y recuperación de determinados flujos. Cualquier reúso debe cumplir condiciones sanitarias y evitar la concentración de productos químicos.

La economía circular amplía la gestión desde la eficiencia hacia la recirculación, el reúso y la recuperación de recursos. Su propósito es mantener el agua más tiempo en el sistema y utilizar una calidad adecuada para cada necesidad. El tratamiento deja de ser únicamente una etapa previa a la descarga y se convierte en una fuente para nuevos usos (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Morseletto et al., 2022).

El agua tratada puede destinarse a servicios sanitarios, riego o limpieza. Las aguas grises de duchas y lavabos suelen tener una carga menor que las aguas negras, pero pueden contener microorganismos, detergentes y productos de higiene personal. Su reúso requiere tratamiento, redes independientes, almacenamiento protegido, señalización y monitoreo (Ho et al., 2024; Silva, 2023a).

El efluente de plantas municipales puede abastecer corredores turísticos para riego, limpieza urbana, áreas recreativas o servicios auxiliares. Esta alternativa genera economías de escala, pero requiere conducción, demanda estable, contratos y estándares de calidad (Georgiou et al., 2023).

El principio de calidad adecuada para cada uso evita emplear agua potable donde no es necesaria y previene la utilización de efluentes insuficientemente tratados en condiciones de exposición humana o ambiental. El tratamiento debe basarse en el riesgo, la vía de exposición, la acumulación y el destino final (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Ho et al., 2024).

El enfoque de múltiples barreras combina prevención, tratamiento, desinfección, almacenamiento, monitoreo y prácticas de uso para evitar que una sola falla comprometa el sistema. En los hoteles, la exposición de trabajadores y visitantes hace especialmente importante la confiabilidad sanitaria (Ho et al., 2024).

Entre los tratamientos se encuentran filtración, sedimentación, procesos biológicos, remoción de nutrientes, desinfección, carbón activado, membranas y oxidación avanzada. La selección depende de la calidad de entrada y del uso previsto. Las tecnologías avanzadas pueden remover contaminantes específicos, pero requieren energía y generan lodos o concentrados que también deben gestionarse (Khan et al., 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

La remoción de nutrientes es especialmente importante en el acuífero costero. Una planta diseñada únicamente para reducir materia orgánica y microorganismos puede liberar nitrógeno o fósforo capaces de deteriorar cenotes, lagunas y sistemas costeros. Los objetivos de calidad deben definirse según el proyecto y el medio receptor (Bauer-Gottwein et al., 2011; UNESCO, 2024).

Los contaminantes emergentes añaden otra prioridad. Los productos farmacéuticos, cosméticos, protectores solares y desinfectantes pueden llegar a las aguas residuales. No todos presentan el mismo riesgo ni requieren igual tratamiento; su monitoreo debe priorizarse según las actividades, la exposición y la vulnerabilidad ambiental (Khan et al., 2024).

Los sistemas centralizados son adecuados para zonas urbanas densas con redes, caudales suficientes y capacidad operativa. Los sistemas descentralizados pueden servir a desarrollos alejados, islas o comunidades pequeñas. Su multiplicidad dificulta la supervisión y exige un esquema regional de operación y rendición de cuentas (Silva, 2023b).

Los sistemas descentralizados pueden instalarse con rapidez, pero requieren diseño acorde con el caudal, energía confiable, reposición de equi-

pos, retiro de lodos y capacitación. Una instalación abandonada o utilizada de manera intermitente puede convertirse en fuente de contaminación.

La conexión al alcantarillado es tan importante como la capacidad de tratamiento. Si viviendas y establecimientos permanecen desconectados, una planta puede quedar subutilizada; si recibe caudales superiores a los previstos, puede desbordarse o tratar inadecuadamente (CAPA, 2024; Silva, 2023b).

La infiltración de agua pluvial o subterránea en los colectores aumenta el caudal y reduce la eficiencia de las plantas. Las conexiones de drenaje pluvial al alcantarillado sanitario también provocan sobrecargas. La rehabilitación de redes forma parte esencial del saneamiento.

El tratamiento no concluye sin una gestión adecuada de lodos. Los biosólidos pueden contener materia orgánica, nutrientes, patógenos y compuestos químicos. La caracterización, estabilización, transporte y trazabilidad son necesarias para su aprovechamiento o disposición. Retirar contaminantes del agua y depositarlos de manera incontrolada en el suelo no constituye circularidad (Crovela et al., 2024).

Las alianzas público-privadas son relaciones contractuales de largo plazo mediante las cuales autoridades y actores privados distribuyen recursos, responsabilidades y riesgos para proveer infraestructura o servicios. En saneamiento pueden abarcar diseño, financiamiento, construcción, operación, mantenimiento, tratamiento avanzado y reúso (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Las modalidades incluyen concesiones con recuperación mediante tarifas; contratos de diseño, construcción, operación y mantenimiento con activos públicos; empresas mixtas; y acuerdos de compra de agua regenerada. Cada esquema distribuye de manera distinta la propiedad, el financiamiento y los riesgos.

La participación privada no implica eficiencia automática. Los resultados dependen de la capacidad institucional, la competencia, la regulación, la transparencia, la asignación de riesgos y la calidad contractual. Las alianzas pueden fomentar innovación, pero también generar rigidez, pasivos contingentes, asimetrías de información y renegociaciones costosas (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Los riesgos deben asignarse a quien tenga mayor capacidad para controlarlos. El socio privado puede asumir diseño, construcción, operación, mantenimiento y desempeño; el Estado conserva regulación, planeación y protección del derecho al agua y del ambiente. Los riesgos de demanda, calidad del afluente, energía y eventos extremos pueden requerir mecanismos compartidos (Global Infrastructure Hub, 2020).

El riesgo de demanda surge cuando la infraestructura se diseña para caudales superiores a los reales o los usuarios previstos no se conectan. Una planta sobredimensionada aumenta los costos unitarios, mientras una subdimensionada pierde capacidad conforme crece la demanda. Las proyecciones deben considerar residentes, población flotante, estacionalidad y desarrollos autorizados (Georgiou et al., 2023).

Las grasas, aceites, productos de limpieza, descargas comerciales y conexiones irregulares pueden alterar el afluente. Los hoteles, restaurantes y lavanderías necesitan pretratamiento cuando sus efluentes pueden afectar las plantas municipales. El operador debe identificar las fuentes y contar con instrumentos para corregirlas (Mejía-Marchena et al., 2023).

El riesgo energético es relevante porque el bombeo, la aireación y los tratamientos avanzados consumen electricidad. Los contratos deben incluir metas de eficiencia y mecanismos para gestionar las variaciones de precios sin eliminar los incentivos del operador. La energía renovable puede reducir emisiones, pero requiere respaldo y mantenimiento.

La remuneración vinculada con el desempeño puede mejorar los incentivos. Los pagos pueden considerar volumen tratado, calidad, disponibilidad, eficiencia energética, reducción de pérdidas y reúso, con deducciones por fallas atribuibles al operador y mecanismos para compartir ahorros verificables (Global Infrastructure Hub, 2020).

El valor público de una alianza comprende saneamiento, salud, protección ambiental, continuidad y acceso. La evaluación financiera debe compararse con alternativas más simples o menos costosas y verificar que el proyecto trate nutrientes, opere de manera continua y gestione los lodos (Lima et al., 2021).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. El diseño permitió vincular literatura sobre turismo, seguridad hídrica, acuíferos kársticos, tratamiento y reúso de aguas residuales, economía circular y alianzas público-privadas.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos estatales de planeación, información oficial sobre aguas subterráneas, estadísticas económicas, legislación ambiental e hídrica y estudios sobre gestión del agua en el turismo. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2025 y se incorporaron trabajos anteriores cuando resultaron necesarios para explicar la hidrogeología regional o conceptos fundamentales.

La búsqueda utilizó términos en español e inglés relacionados con turismo, consumo de agua, saneamiento hotelero, acuífero kárstico, cenotes, reúso de aguas residuales, contaminantes emergentes, alianzas público-privadas y Quintana Roo.

Los criterios de inclusión fueron pertinencia, procedencia académica u oficial, actualidad, claridad metodológica y posibilidad de transferencia al contexto turístico. Se excluyeron materiales promocionales y documentos que equiparaban la construcción de infraestructura con saneamiento sin examinar operación, conexiones y calidad.

La información se organizó en siete categorías: vulnerabilidad territorial; eficiencia turística; cobertura y operación del saneamiento; tratamiento y reúso en entornos costeros; distribución contractual de riesgos; financiamiento y equidad; y transparencia, monitoreo y participación social.

Los resultados constituyen una síntesis teórica y no una evaluación de operadores, hoteles o plantas específicas. La información pública no permite comparar homogéneamente consumo, conexiones, caudales tratados, calidad y costos entre municipios y establecimientos. Esta limitación constituye un problema de gobernanza.

Resultados

Vulnerabilidad territorial y planeación del crecimiento

El primer resultado es que la planeación del saneamiento debe seguir los límites funcionales del acuífero y no solo las fronteras administrativas. Las zonas de desarrollo, cenotes, humedales, lagunas y costas están conectadas por flujos subterráneos, de modo que una descarga infiltrada puede afectar sitios alejados del origen (Bauer-Gottwein et al., 2011).

Los proyectos nuevos deben autorizarse únicamente cuando exista capacidad comprobada de abastecimiento, recolección, tratamiento, disposición y reúso. Disponer de suelo o capital no significa que el agua esté disponible. Los impactos acumulativos de todos los desarrollos deben evaluarse de manera conjunta.

La planeación debe diferenciar áreas consolidadas, corredores de crecimiento, islas, comunidades rurales y zonas ecológicamente sensibles. Cancún y Playa del Carmen pueden favorecer soluciones centralizadas; otros territorios requieren sistemas modulares, humedales construidos o tratamientos descentralizados con supervisión regional.

Las proyecciones deben incorporar población flotante, ocupación hotelera, trabajadores y variaciones estacionales. Diseñar únicamente con base en residentes registrados puede subestimar las necesidades de los destinos turísticos (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

Los permisos de construcción deben condicionarse a capacidad real desde el inicio de las operaciones. Las cartas de factibilidad no deben basarse en la expectativa de que la infraestructura se construirá después de aprobar el desarrollo.

Cuando un proyecto genera demanda adicional de infraestructura, debe contribuir a financiarla mediante aportaciones, derechos de conexión u otros mecanismos transparentes. Así se evita que la población existente subsidie el crecimiento privado.

Eficiencia hídrica en el sector turístico

El segundo resultado es que la eficiencia debe preceder a la expansión de la oferta. Los hoteles requieren balances por proceso, metas absolutas y programas de detección de fugas. El monitoreo mensual agregado debe complementarse con datos de habitaciones, lavanderías, cocinas, piscinas y jardines (Gössling et al., 2012; Morsetto et al., 2022).

Las métricas por habitación ocupada permiten comparar periodos y establecimientos, pero pueden mejorar simplemente por mayor ocupación. Deben acompañarse del consumo total, el origen del agua y el volumen de aguas residuales generado.

La detección digital ayuda a reducir fugas en redes internas, habitaciones, equipos y jardines. Los sensores deben conectarse con protocolos de reparación, inventarios y responsables. Las alertas sin seguimiento operativo tienen poco valor.

Las lavanderías requieren control de cargas, operación eficiente y recuperación de corrientes. Cuando el servicio se subcontrata, el hotel debe evaluar el consumo y las descargas del proveedor para evitar que las mejoras internas sean solo un desplazamiento territorial.

Los jardines deben emplear especies adaptadas al clima y la salinidad. La vegetación ornamental de alta demanda aumenta el consumo y, combinada con fertilización y riego excesivos, incrementa la infiltración de nutrientes. El agua regenerada puede utilizarse cuando su calidad y aplicación protegen a trabajadores, huéspedes y acuíferos.

Las piscinas requieren detección de fugas, control de niveles, recirculación y mantenimiento. El agua de retrolavado contiene sólidos y desinfectantes y, por lo general, necesita tratamiento antes de reutilizarse o descargarse.

Los balances deben incluir los sistemas de agua caliente y enfriamiento. Los condensados pueden recuperarse cuando se generan en cantidades suficientes, y las torres de enfriamiento deben optimizar el consumo de agua y energía. Cualquier sustitución tecnológica requiere una evaluación integral de desempeño.

Las certificaciones ambientales pueden promover buenas prácticas, pero no sustituyen la medición pública ni el cumplimiento. Los criterios deben

demostrar resultados y no basarse únicamente en políticas o equipos instalados.

Conexión, recolección y tratamiento efectivo

El tercer resultado es que la cobertura de saneamiento debe medirse como acceso funcional y no como mera existencia de tuberías o plantas. Un sistema incompleto permite que las aguas residuales continúen infiltrándose, aunque se haya construido infraestructura básica (CAPA, 2024; Silva, 2023b).

Se necesita un inventario georreferenciado de hoteles, viviendas, comercios, plantas, fosas sépticas y puntos de descarga. Esta información permite identificar usuarios sin conexión, infraestructura obsoleta y establecimientos con tratamiento propio.

La conexión debe ser obligatoria cuando existe una red con capacidad suficiente. Los sistemas individuales solo deberían mantenerse cuando demuestren un desempeño equivalente o superior mediante monitoreo continuo.

Las inspecciones deben detectar conexiones irregulares entre drenaje pluvial y sanitario. Las lluvias pueden sobrecargar plantas y estaciones de bombeo, mientras las descargas sanitarias hacia sistemas pluviales alcanzan directamente el territorio.

La operación debe reportar disponibilidad, caudal recibido y tratado, materia orgánica, nutrientes, microorganismos, energía y lodos. La capacidad nominal no informa cuánto se trata efectivamente ni con qué calidad.

La operación requiere presupuestos plurianuales. Construir con recursos extraordinarios es insostenible cuando las tarifas o contratos no cubren energía, personal, reactivos, laboratorios, mantenimiento y reposición de equipos.

Los establecimientos con plantas propias deben reportar caudal, calidad, incidentes y destino del efluente. La supervisión no puede concluir con la autorización inicial, pues los sistemas se deterioran con el tiempo.

Las plantas pequeñas pueden operar bajo un gestor regional especializado. Este modelo conserva instalaciones descentralizadas y comparte laboratorios, mantenimiento, refacciones y personal.

Tratamiento basado en riesgos y protección del acuífero

El cuarto resultado es que la calidad del efluente debe definirse según la vulnerabilidad del acuífero y el destino final. Cumplir un límite general puede ser insuficiente para una infiltración en sistemas kársticos conectados con cenotes y el mar (Bauer-Gottwein et al., 2011; Khan et al., 2024).

La NOM-001-SEMARNAT-2021 actualizó los límites de descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación. Sin embargo, la infiltración, el alcantarillado, el reúso y las condiciones locales pueden requerir disposiciones adicionales. La coordinación regulatoria debe evitar que una descarga aceptable bajo un criterio resulte insuficiente frente a otro (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

Las plantas ubicadas en zonas vulnerables deben incorporar remoción de nitrógeno y fósforo. El tratamiento secundario convencional reduce materia orgánica y microorganismos, pero puede ser insuficiente para controlar nutrientes.

La desinfección debe equilibrar la inactivación de microorganismos con la prevención de subproductos. El cloro es eficaz y mantiene un residual, pero puede combinarse con radiación ultravioleta u otras tecnologías según la calidad y el uso previsto.

Se requiere una estrategia de priorización para contaminantes emergentes. No es viable medir permanentemente todas las sustancias. El monitoreo debe basarse en las actividades, los compuestos utilizados, los riesgos, la exposición y la capacidad de remoción (Khan et al., 2024).

Los hospitales, lavanderías y otras instalaciones con efluentes particulares pueden requerir pretratamiento. La descarga indiscriminada traslada contaminantes a sistemas municipales que no fueron diseñados para eliminarlos.

Los pozos de absorción no deben utilizarse como una vía simple para ocultar descargas. Su autorización requiere evaluar calidad, profundidad, flujo subterráneo, distancia a captaciones y capacidad de monitoreo.

Los lodos deben contar con rutas legales y trazables. Las plantas pequeñas pueden acumularlos o entregarlos a transportistas sin control suficiente. Los contratos deben establecer el destino final y conservar registros verificables.

Reúso y circularidad en los destinos turísticos

El quinto resultado es que el reúso reduce extracciones y descargas cuando sustituye agua convencional. Los usos iniciales más viables son riego, servicios sanitarios, limpieza urbana y determinados sistemas de enfriamiento (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Georgiou et al., 2023).

Los hoteles con plantas propias pueden instalar redes internas de agua regenerada. La infraestructura requiere señalización, prevención de conexiones cruzadas, almacenamiento protegido y monitoreo de calidad.

Las redes de agua regenerada pueden abastecer corredores hoteleros desde plantas municipales. Los establecimientos funcionan como usuarios ancla y pueden contratar el tratamiento adicional y la conducción necesarios.

Los contratos deben definir calidad, volumen, presión, continuidad, tarifas y respuesta ante incumplimientos. El proveedor responde por la calidad hasta el punto de entrega y el hotel por la operación de su red interna.

El agua regenerada no debe utilizarse para ampliar indefinidamente jardines, campos recreativos o elementos ornamentales. El proyecto necesita una línea base y debe demostrar una reducción posterior del consumo convencional.

El mismo volumen puede contabilizarse varias veces y producir porcentajes engañosos. Los indicadores deben distinguir agua regenerada suministrada, uso consuntivo y agua subterránea o potable efectivamente sustituida.

La recarga gestionada de acuíferos es más compleja que el reúso no potable. La elevada conectividad kárstica puede transportar contaminantes con rapidez. Cualquier proyecto exige tratamiento avanzado, evaluación hidrogeológica, monitoreo y planes de contingencia.

La captación de lluvia puede complementar el reúso, especialmente en techos y superficies controladas. Su estacionalidad y necesidad de almacenamiento impiden considerarla un sustituto del saneamiento.

Alianzas público-privadas para infraestructura y operación

El sexto resultado es que las alianzas deben responder a problemas específicos. No se requiere una concesión integral para todas las necesidades. Los contratos pueden limitarse a construcción, rehabilitación, operación, reducción de fugas, tratamiento avanzado o suministro de agua regenerada (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

La autoridad debe comparar contratación tradicional, operación pública fortalecida, gestión regional y alianzas de largo plazo. La participación privada solo se justifica cuando la transferencia de riesgos, las capacidades y las mejoras de eficiencia compensan su mayor costo financiero.

Los contratos de diseño, construcción, operación y mantenimiento vinculan el diseño con el costo del ciclo de vida. Cuando la remuneración depende del desempeño, el operador tiene incentivos para elegir equipos confiables y mantenerlos.

Los hoteles pueden participar mediante contratos de compra de agua regenerada, aportaciones a redes troncales y fondos de saneamiento. La nueva capacidad puede financiarse en proporción a los beneficios obtenidos por cada empresa.

La infraestructura requerida por un desarrollo inmobiliario debe ser financiada por el desarrollador. Aprobar proyectos con la expectativa de que el gobierno ampliará los servicios posteriormente traslada costos privados a la sociedad.

Los contratos no deben otorgar abastecimiento prioritario a una empresa por haber financiado infraestructura. Durante emergencias, el consumo humano y doméstico debe conservar la prioridad conforme a la normativa aplicable.

La infraestructura estratégica puede permanecer en propiedad pública aunque sea operada por un privado. El contrato debe regular mantenimiento, reposición, reversión de activos y transferencia de información y tecnología.

Las cláusulas de terminación deben permitir restablecer la operación ante incumplimiento grave, insolvencia o riesgo sanitario y asegurar la continuidad del servicio durante la transición.

Distribución de riesgos y desempeño

El séptimo resultado es asignar cada riesgo a la parte con mayor capacidad para gestionarlo. El socio privado puede asumir diseño y construcción; la autorización y planeación corresponden al sector público; y la demanda, la calidad del afluente, la energía y los eventos extremos pueden requerir mecanismos compartidos (Global Infrastructure Hub, 2020).

Los riesgos de construcción incluyen retrasos, sobrecostos y desempeño de los equipos. Los pagos deben condicionarse a la puesta en servicio y a pruebas de desempeño, no solo a la terminación física de la obra.

La operación comprende calidad, continuidad, mantenimiento, energía y gestión de lodos. Los contratos deben establecer indicadores durante toda su vigencia y deducciones automáticas cuando las fallas sean atribuibles al operador.

El riesgo de demanda depende de las conexiones y los caudales reales. El gobierno debe establecer reglas de conexión y planear adecuadamente; pagar toda la capacidad ociosa derivada de proyecciones deficientes puede generar costos injustificados.

Las bandas de precios, metas de eficiencia y mecanismos para compartir ahorros pueden distribuir el riesgo energético. Trasladar todos los aumentos al sector público elimina incentivos para optimizar el consumo.

Los planes de continuidad deben cubrir huracanes, inundaciones y fallas eléctricas mediante energía de respaldo, almacenamiento, protección física y procedimientos para evitar descargas sin tratamiento.

La definición de fuerza mayor no debe ser tan amplia que permita al operador eludir la responsabilidad por falta de mantenimiento. El contrato debe distinguir los eventos extraordinarios de las fallas previsibles.

La calidad variable del afluente debe controlarse antes de la descarga. Cuando ingresan sustancias no autorizadas, el operador puede perder capacidad para garantizar resultados, pero debe contar con monitoreo para detectarlas y la autoridad debe inspeccionar y sancionar.

Financiamiento, tarifas y equidad

El octavo resultado es la necesidad de financiamiento sostenible para el saneamiento. Las tarifas, derechos de conexión, aportaciones de desarrolladores, recursos públicos y pagos por agua regenerada pueden combinarse según la naturaleza del proyecto.

Las tarifas deben reflejar razonablemente los costos de operación y mantenimiento y proteger el consumo doméstico básico. Los subsidios generales suelen beneficiar más a los usuarios de mayor consumo; el apoyo focalizado protege mejor a los hogares vulnerables (UNESCO, 2024).

El turismo genera demanda, ingresos y externalidades que justifican mecanismos específicos de contribución. Una proporción transparente y trazable de los ingresos o impuestos vinculados con el desarrollo turístico puede destinarse al saneamiento.

Las aportaciones empresariales no sustituyen las tarifas ordinarias. Un hotel que financia una iniciativa conjunta conserva la obligación de pagar los servicios y cumplir los límites aplicables.

Los fondos deben publicar ingresos, proyectos, contratos, tarifas y resultados. Sin trazabilidad, el saneamiento puede convertirse en un instrumento discrecional o reputacional.

La selección de proyectos debe priorizar riesgos y beneficios territoriales, no solo la visibilidad turística. Los barrios de trabajadores y las comunidades locales también requieren agua, alcantarillado y saneamiento.

La planeación fiscal debe reconocer los pasivos contingentes de las alianzas, como garantías, pagos mínimos independientemente de la demanda y compensaciones por terminación (Global Infrastructure Hub, 2020).

Transparencia, monitoreo y participación social

El noveno resultado es que la gobernanza necesita información sobre disponibilidad, redes, plantas, calidad, tarifas y contratos. Los datos deben presentarse por municipio, sistema e instalación con metodologías comparables.

Los operadores públicos y privados deben informar capacidad, volumen recibido y tratado, cumplimiento, energía, incidentes, lodos y agua regenerada.

Los datos excesivamente agregados impiden identificar instalaciones problemáticas.

El monitoreo empresarial debe validarse mediante laboratorios acreditados y muestreos independientes. El operador puede generar datos operativos, pero no controlar por completo la evaluación regulatoria.

El acuífero requiere una red que integre pozos, cenotes, lagunas y zonas costeras. Los datos de niveles, conductividad, nutrientes y microorganismos permiten detectar tendencias y orientar inspecciones (Bauer-Gottwein et al., 2011).

Las universidades y centros de investigación pueden apoyar la supervisión, modelación y evaluación tecnológica. Deben transparentar el financiamiento y conservar la libertad para publicar resultados desfavorables.

Las comunidades deben participar desde la planeación. Su conocimiento permite identificar barrios con malos olores, desbordamientos, depósitos de residuos, fosas y cambios en cenotes. Estas observaciones deben combinarse con investigaciones sistemáticas para mejorar el diagnóstico.

Los residentes, trabajadores y visitantes necesitan mecanismos de queja accesibles, con plazos, seguimiento y publicación de acciones correctivas.

Los contratos deben publicar duración, obligaciones, garantías, indicadores, tarifas y procedimientos de renegociación. Las obligaciones fiscales, los parámetros ambientales y los incumplimientos no pueden ocultarse mediante confidencialidad comercial.

Protección de ecosistemas y resiliencia climática

El décimo resultado es que el saneamiento debe integrarse con la protección de cenotes, manglares, humedales, lagunas y arrecifes. Estos ecosistemas no son elementos aislados, sino componentes conectados con la circulación y calidad del agua (Bauer-Gottwein et al., 2011; UNESCO, 2024).

Ordenamiento territorial de zonas de recarga y corredores subterráneos

La eliminación de vegetación y la construcción en zonas vulnerables sellan el suelo, modifican la infiltración y aumentan la exposición a contaminantes.

Los manglares y humedales contribuyen a la regulación hidrológica y al tratamiento natural de determinados flujos, pero su capacidad es limitada. No deben utilizarse como receptores de efluentes insuficientemente tratados ni sustituir instalaciones adecuadas.

Las soluciones basadas en la naturaleza pueden complementar plantas descentralizadas y controlar escurrimientos. Su diseño debe considerar carga, superficie, mantenimiento, mosquitos, salinidad y eventos extremos.

Los huracanes pueden interrumpir la energía, dañar estaciones de bombeo y provocar desbordamientos. Los sistemas requieren generadores, almacenamiento, protección física y equipos de respuesta.

Las extracciones costeras pueden alterar el equilibrio entre agua dulce y salada y favorecer la intrusión marina. La eficiencia y el reúso pueden reducir el bombeo, pero sus efectos deben validarse mediante análisis hidrogeológicos (Bauer-Gottwein et al., 2011).

El cambio climático modifica los patrones de precipitación, eleva el nivel del mar y agrava los eventos extremos. La infraestructura debe diseñarse para condiciones futuras y no únicamente con base en registros históricos (UNESCO, 2024).

Modelo de turismo y saneamiento corresponsable

A partir del análisis se propone un modelo integrado con ocho componentes: planeación territorial; eficiencia turística; conexión universal; tratamiento basado en riesgos; reúso; alianzas basadas en desempeño; financiamiento equitativo; y monitoreo independiente con participación social.

La planeación territorial vincula el crecimiento con la capacidad de abastecimiento y saneamiento. La eficiencia turística reduce la demanda y los caudales posteriores al consumo. La conexión universal evita descargas aisladas cuando existe infraestructura disponible.

El tratamiento basado en riesgos adapta la calidad a la vulnerabilidad del acuífero y al uso previsto. El reúso sustituye agua convencional. Las alianzas distribuyen inversiones y responsabilidades mediante indicadores verificables.

El financiamiento equitativo asigna contribuciones a los desarrollos que generan y reciben beneficios, mientras protege el consumo básico. La información pública y el monitoreo independiente permiten ajustar las decisiones.

El modelo opera en tres escalas: la propiedad, donde se controlan consumo y descargas; el corredor turístico, donde se comparten redes, plantas y reúso; y el acuífero, donde se evalúan calidad, extracciones y ecosistemas.

Los indicadores deben incluir consumo absoluto y por huésped, pérdidas, conexiones, caudal recolectado y tratado, remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos, agua regenerada, agua convencional sustituida, energía, lodos, incidentes, continuidad del servicio y evolución de los ecosistemas.

La evaluación debe abarcar toda la vida útil de la infraestructura. Una planta puede cumplir al inicio y deteriorarse por falta de mantenimiento, crecimiento de la demanda o cambios del afluente. Los contratos y programas públicos requieren revisiones periódicas.

Los logros no deben medirse solo por el número de plantas, kilómetros de tubería o recursos invertidos. El resultado final debe ser una reducción sostenida de descargas, captaciones y riesgos, acompañada de mayor acceso y protección de los ecosistemas.

Conclusiones

El turismo es una actividad económica fundamental para Quintana Roo, pero su sostenibilidad depende de un acuífero kárstico vulnerable y de ecosistemas vinculados con el agua subterránea. La degradación de estas fuentes afecta la salud, la población, la competitividad y el patrimonio natural.

El crecimiento turístico y urbano debe corresponder con la capacidad de abastecimiento y saneamiento. Autorizar desarrollos sin infraestructura traslada costos al Estado, a los residentes y a los ecosistemas.

La eficiencia hotelera constituye la primera línea de acción. La demanda puede reducirse mediante medición, detección y reparación de fugas, sustitución de equipos ineficientes, gestión de lavanderías, paisajismo adaptado y recuperación de corrientes. Las mejoras relativas deben acompañarse de metas absolutas.

La conexión al alcantarillado es tan importante como la construcción de plantas. La capacidad nominal no produce saneamiento cuando los usuarios permanecen desconectados o las redes presentan fugas y sobrecargas.

El tratamiento debe responder a la vulnerabilidad del acuífero, la remoción de nutrientes, los contaminantes emergentes y el destino del efluente. Cumplir un límite general no garantiza por sí mismo la protección de cenotes, lagunas o arrecifes.

El reúso reduce captaciones cuando sustituye agua potable o subterránea. Su contribución debe medirse mediante el volumen efectivamente desplazado y no solo con porcentajes internos de recirculación.

Las alianzas público-privadas pueden movilizar capital, tecnología y capacidad operativa. Su conveniencia depende de la competencia, la asignación de riesgos, la rendición de cuentas, la transparencia y la supervisión pública.

La participación privada no exime al Estado de planear, regular y proteger el derecho humano al agua y al saneamiento. Los contratos no deben otorgar derechos preferentes de abastecimiento a las empresas.

Los desarrolladores y establecimientos que generan nueva demanda deben contribuir a financiar la infraestructura correspondiente. Las comunidades existentes no deben subsidiar la expansión privada.

La legitimidad también depende de la equidad. Los barrios de trabajadores y las comunidades locales deben recibir prioridad en agua, alcantarillado y saneamiento, y no únicamente los corredores turísticos.

El monitoreo debe integrar plantas, pozos, cenotes y sistemas costeros. La información pública sobre caudales, calidad, contratos e incidentes reduce las asimetrías y permite evaluar resultados.

El modelo conecta la propiedad, el corredor turístico y el acuífero. Su éxito dependerá de que las mejoras internas produzcan beneficios territoriales verificables y no solo seguridad privada para los establecimientos.

Quintana Roo necesita una relación entre turismo e infraestructura que proteja el agua. Para ser sostenible, el sector debe financiar, operar y conservar los sistemas de los que depende, sin trasladar riesgos a la población ni degradar los ecosistemas que constituyen su principal atractivo.

Referencias

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., y Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo. (2024). Programa Institucional de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado 2023-2027. Gobierno del Estado de Quintana Roo.
- Comisión Nacional del Agua. (2024). Disponibilidad media anual de agua subterránea en los acuíferos del estado de Quintana Roo. Gobierno de México.
- Crovella, T., Paiano, A., Falciglia, P. P., Lagioia, G., e Ingraio, C. (2024). Wastewater recovery for sustainable agricultural systems in the circular economy: A systematic literature review of life cycle assessments. *Science of the Total Environment*, 912, 169310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169310>
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Georgiou, I., Caucci, S., Morris, J. C., Guenther, E., y Krebs, P. (2023). Assessing the potential of water reuse uptake through a private–public partnership: A practitioner's perspective. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 199-220. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00166-w>
- Global Infrastructure Hub. (2020). PPP risk allocation tool 2019 edition. <https://ppp-risk.gihub.org/>
- Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2023). Plan Estatal de Desarrollo Quintana Roo 2023-2027.
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., y Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>
- Ho, J., Ahmadi, J., Schweikart, C., Hübner, U., Schwaller, C., Tiehm, A., y Drewes, J. E. (2024). Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. *Water Research*, 267, 122429. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122429>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Censos Económicos 2024: Resultados definitivos. INEGI.
- Khan, U. A., Löffler, P., Spilsbury, F., Wiberg, K., Stålsby Lundborg, C., y Lai, F. Y. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and

- prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136175. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136175>
- Lima, S., Brochado, A., y Marques, R. C. (2021). Public-private partnerships in the water sector: A review. *Utilities Policy*, 69, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101182>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public-private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C., Arismendy-Montes, L., y Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: Advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2198147>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Secretaría de Turismo de Quintana Roo. (2024). Indicadores turísticos de Quintana Roo 2024. Gobierno del Estado de Quintana Roo.
- Silva, J. A. (2023a). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Silva, J. A. (2023b). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water*, 15(17), 3064. <https://doi.org/10.3390/w15173064>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz. UNESCO.

Conclusiones generales



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.10.01>

La gestión sostenible del agua en México exige superar las respuestas fragmentadas, sectoriales y predominantemente reactivas que durante décadas han orientado buena parte de la política hídrica y de las decisiones empresariales. Los diez casos analizados muestran que los problemas de disponibilidad, contaminación, saneamiento, sobreexplotación, desigualdad y vulnerabilidad climática no pueden resolverse mediante una sola tecnología, una obra aislada o la intervención exclusiva de una institución. Se requiere una transformación de los modelos productivos, de los mecanismos de coordinación y de las relaciones entre el Estado, las empresas y la sociedad.

La primera conclusión general es que no existe una crisis hídrica homogénea. Cada territorio presenta condiciones hidrológicas, económicas, sociales e institucionales particulares. Nuevo León enfrenta la necesidad de fortalecer la resiliencia de una economía industrial expuesta a sequías y crisis de abastecimiento; Baja California debe evaluar la desalación dentro de una estrategia que incorpore energía, salmuera, tarifas y riesgos fiscales; Sonora requiere compatibilizar la actividad minera con la prevención de daños, la transparencia y la reparación; y Chihuahua debe evitar que la tecnificación del riego produzca una expansión del consumo total.

En Guanajuato, la sobreexplotación de acuíferos obliga a vincular la manufactura y la agroindustria con la economía circular del agua. Querétaro presenta oportunidades para sustituir extracciones mediante agua regenerada y redes industriales de reúso. Jalisco necesita fortalecer la gobernanza de la cuenca Lerma-Chapala y construir formas legítimas de acción colectiva empresarial. Puebla enfrenta el desafío de sanear el río Atoyac

mediante una combinación de cumplimiento, infraestructura, monitoreo y justicia ambiental. Veracruz requiere transformar la gestión hídrica de sus corredores petroquímicos, mientras que Quintana Roo debe vincular el crecimiento turístico con la protección de un acuífero kárstico especialmente vulnerable.

Estas diferencias confirman que las soluciones deben diseñarse desde el territorio. La gestión hídrica no puede basarse únicamente en promedios nacionales, balances administrativos generales o indicadores corporativos agregados. Las decisiones deben considerar las características de la cuenca o del acuífero, la localización de los usuarios, la calidad del recurso, los ecosistemas, las condiciones climáticas, la infraestructura disponible y la distribución de los riesgos.

La cuenca y el acuífero como unidades fundamentales

Una de las principales aportaciones de la obra consiste en demostrar que la sostenibilidad debe evaluarse más allá del perímetro de las instalaciones. Una empresa puede contar con un desempeño interno favorable y continuar dependiendo de una fuente deteriorada. También puede reducir el consumo por unidad producida y aumentar simultáneamente la extracción total debido al crecimiento de sus operaciones.

Por esta razón, la unidad empresarial debe relacionarse con la unidad territorial. Los balances internos permiten identificar pérdidas, consumos, recirculaciones y descargas, pero la evaluación definitiva requiere observar los efectos sobre la cuenca, el acuífero o el sistema urbano. La eficiencia de una instalación no equivale automáticamente a seguridad hídrica territorial.

La escala de cuenca permite identificar interdependencias. Las extracciones realizadas aguas arriba modifican la disponibilidad aguas abajo; las descargas pueden desplazarse y acumularse; los retornos agrícolas alimentan determinados sistemas; y las decisiones urbanas, industriales y agropecuarias compiten por las mismas fuentes. Esta interconexión resulta evidente en el lago de Chapala y el río Atoyac, pero también está presente en los acuíferos industriales del centro y norte del país.

El análisis territorial también permite evitar falsas soluciones. Trasladar agua desde otra región, utilizar una fuente alternativa o construir una nueva planta puede resolver temporalmente el abastecimiento de determinados usuarios, pero generar mayores presiones sobre otros territorios. Toda intervención debe evaluar sus impactos directos, indirectos y acumulativos.

La responsabilidad empresarial antecede a la colaboración

La segunda conclusión general es que la colaboración empresarial solo es legítima cuando se sustenta en el cumplimiento de las responsabilidades individuales. Las empresas deben medir sus consumos, prevenir fugas, reducir contaminantes, operar correctamente sus sistemas de tratamiento, informar sobre sus impactos y reparar los daños que les sean atribuibles.

Las acciones voluntarias no sustituyen estas obligaciones. La financiación de una planta municipal, un proyecto de restauración, una campaña de reforestación o una plataforma colectiva no compensa automáticamente una descarga incumplida, una extracción excesiva o una falta de mantenimiento. La responsabilidad obligatoria y la cooperación voluntaria deben permanecer claramente diferenciadas.

Esta distinción resulta especialmente importante en sectores con impactos potencialmente elevados, como la minería, la petroquímica, la curtiduría y determinadas actividades manufactureras. La colaboración no puede convertirse en un mecanismo para negociar límites menos estrictos, reducir sanciones o mejorar la reputación sin modificar el desempeño real.

La responsabilidad empresarial debe extenderse hacia las cadenas de suministro. Las empresas tractoras influyen sobre agricultores, fabricantes de componentes, lavanderías, proveedores de tratamientos superficiales, transportistas y otros actores que pueden concentrar una parte sustancial del consumo o de la contaminación. Las políticas de compra y contratación pueden impulsar mejoras, pero deben acompañarse de asistencia técnica, financiamiento y plazos razonables para no excluir a pequeños productores y empresas.

La rectoría pública es irrenunciable

La tercera conclusión es que la participación privada no elimina la responsabilidad del Estado. Las autoridades deben conservar las funciones de planeación, regulación, inspección, sanción, información y garantía del derecho humano al agua y al saneamiento.

El agua no puede asignarse exclusivamente conforme a la capacidad económica de los usuarios. La prioridad del consumo humano y doméstico debe reflejarse en los permisos, protocolos de emergencia, contratos y decisiones de inversión. Las empresas que financian infraestructura no deben obtener privilegios regulatorios, acceso preferente o influencia desproporcionada sobre las decisiones públicas.

La rectoría pública también implica mantener capacidades técnicas. Los contratos complejos, las tecnologías avanzadas y los esquemas de financiamiento pueden generar asimetrías cuando el operador privado posee más información que la entidad encargada de supervisarlos. Sin equipos públicos especializados, indicadores claros y auditorías independientes, las alianzas pueden producir dependencia y pérdida de control.

La coordinación entre niveles de gobierno constituye otra condición indispensable. Muchos problemas involucran competencias federales, estatales y municipales. Las concesiones, las descargas, el alcantarillado, el desarrollo urbano, la salud, el ambiente y la protección civil suelen estar distribuidos entre distintas instituciones. La ausencia de coordinación genera vacíos, duplicidades y conflictos que retrasan o debilitan las intervenciones.

La tecnología es necesaria, pero no suficiente

La cuarta conclusión general es que las soluciones tecnológicas deben insertarse en sistemas de gestión. La desalación, los sistemas de riego presurizado, las membranas, la oxidación avanzada, los sensores, la digitalización y las plantas de tratamiento pueden producir beneficios importantes, pero no garantizan por sí mismos sostenibilidad.

La tecnología requiere una línea base, personal capacitado, energía, mantenimiento, reposición de componentes, monitoreo y presupuesto de largo plazo. Una planta construida que opera intermitentemente, un medidor que no se lee o un sistema de riego abandonado después de pocos ciclos representan inversiones sin resultado ambiental.

La selección tecnológica debe responder a la calidad inicial, el uso final, las capacidades operativas y las condiciones del territorio. No siempre la alternativa más compleja es la más adecuada. El riego superficial correctamente diseñado puede ser más viable que un sistema presurizado en determinados contextos; una solución descentralizada puede ser preferible a una planta central cuando la población se encuentra dispersa; y un tratamiento avanzado puede ser innecesario para usos industriales de menor exigencia.

La evaluación debe considerar también la energía y los residuos. Las membranas, la desalación y los sistemas de descarga líquida cero pueden reducir la extracción o el volumen descargado, pero generan salmueras, concentrados, lodos y consumos energéticos. Una solución no es sostenible cuando transfiere el problema del agua hacia el suelo, el mar, el aire o los residuos peligrosos.

La economía circular debe demostrar resultados territoriales

La quinta conclusión es que la economía circular del agua ofrece un marco útil para transformar los procesos productivos, siempre que no se limite a declaraciones, porcentajes o tecnologías aisladas.

La circularidad debe comenzar con la prevención. Antes de tratar y reutilizar, es necesario reducir consumos innecesarios, reparar fugas, modificar procedimientos y separar corrientes. La recirculación interna y el reúso externo deben incorporarse después de estas acciones.

La separación de corrientes conserva el valor del agua y facilita el tratamiento. Mezclar efluentes relativamente limpios con corrientes contaminadas aumenta el volumen, eleva los costos y reduce las posibilidades de recuperación. Esta condición es particularmente relevante en la agroindustria,

la curtiduría, la manufactura automotriz, la petroquímica y los establecimientos turísticos.

El reúso debe medirse mediante sustitución. Incorporar agua regenerada no produce necesariamente una reducción territorial cuando se mantienen las extracciones anteriores o se amplían las superficies, jardines, procesos o producción. El indicador principal debe ser el volumen de agua convencional efectivamente sustituido.

La recuperación de energía, hidrocarburos, nutrientes, calor y materiales puede mejorar la viabilidad económica del tratamiento. Sin embargo, cada corriente requiere caracterización y una ruta segura de aprovechamiento. Un residuo no se convierte en recurso únicamente porque se le asigne un uso potencial. La simbiosis industrial puede generar economías de escala mediante plantas compartidas, redes de agua regenerada, laboratorios, vapor, almacenamiento y servicios de emergencia. Estos intercambios requieren contratos, estándares, medición, respaldo y mecanismos para gestionar la salida o incumplimiento de alguno de los participantes.

Las alianzas público-privadas deben evaluarse por su valor público

La sexta conclusión es que las alianzas público-privadas constituyen instrumentos y no fines en sí mismas. Su conveniencia no se demuestra únicamente por la cantidad de inversión privada movilizada o por la posibilidad de construir infraestructura sin un desembolso público inmediato.

Toda inversión privada debe recuperarse mediante tarifas, pagos gubernamentales, contratos de compra o garantías. Por ello, la evaluación debe considerar el ciclo de vida, los riesgos fiscales, las obligaciones contingentes, las condiciones de terminación y las posibles renegociaciones.

La asignación de riesgos debe corresponder con la capacidad de cada parte. El socio privado puede asumir diseño, construcción, operación y mantenimiento; el Estado debe conservar la regulación, supervisión y protección del interés público. Los riesgos de demanda, calidad del influente, energía, eventos climáticos o cambios regulatorios pueden requerir esquemas compartidos.

Los contratos de desempeño ofrecen ventajas cuando vinculan la remuneración con resultados verificables. La calidad del efluente, la disponibilidad de una planta, la reducción de fugas, el ahorro energético o la sustitución de extracciones son indicadores más útiles que el número de equipos instalados o la terminación física de una obra.

Las alianzas deben incorporar transparencia contractual. Los costos, plazos, garantías, tarifas, penalizaciones, modificaciones y resultados deben ser públicos. La confidencialidad comercial no puede utilizarse para ocultar compromisos fiscales o ambientales.

La participación pública debe justificarse mediante beneficios territoriales. El Estado puede financiar redes troncales, monitoreo, investigación, restauración o infraestructura colectiva. No resulta adecuado utilizar recursos públicos para cubrir obligaciones individuales de empresas solventes o garantizar exclusivamente su abastecimiento.

La transparencia y el monitoreo son condiciones de la sostenibilidad

La séptima conclusión es que no puede gestionarse aquello que no se mide y no puede exigirse rendición de cuentas sobre información que permanece oculta o fragmentada. Los balances empresariales deben distinguir captación, agua adquirida, consumo consuntivo, recirculación, descarga y calidad. Los datos corporativos agregados no permiten evaluar los impactos de cada instalación ni relacionarlos con el territorio.

La infraestructura pública debe informar capacidad, caudal recibido, volumen tratado, cumplimiento, consumo energético, lodos, incidentes y costos. La capacidad nominal de una planta no demuestra su funcionamiento ni su contribución al saneamiento.

El monitoreo ambiental debe integrar agua superficial, subterránea, sedimentos, ecosistemas y variables sociales. Los sensores en línea facilitan la detección de cambios, pero no sustituyen los análisis de laboratorio para contaminantes específicos. Las observaciones comunitarias también pueden ayudar a localizar episodios intermitentes, olores, espumas, cambios de color o afectaciones ecológicas.

La verificación debe ser independiente. Las empresas y operadores necesitan generar datos para administrar sus procesos, pero no deben controlar exclusivamente la evaluación regulatoria. Las universidades y centros de investigación pueden contribuir, siempre que se proteja su independencia y se transparenten los conflictos de interés.

La información debe presentarse en formatos comprensibles y permitir el acceso a las series y metodologías. Los tableros resumidos facilitan la consulta, pero no deben ocultar los datos primarios ni simplificar problemas complejos mediante indicadores aislados.

La justicia hídrica debe orientar las decisiones

La octava conclusión es que la sostenibilidad no puede evaluarse únicamente mediante indicadores técnicos y económicos. Es necesario analizar quién recibe los beneficios, quién soporta los costos y quién participa en las decisiones.

Las comunidades situadas cerca de ríos contaminados, corredores industriales, minas, zonas turísticas o instalaciones petroquímicas pueden enfrentar riesgos sanitarios y ambientales sin recibir una proporción equivalente de los beneficios. La recuperación del río Atoyac, la protección del lago de Chapala, la gestión de los corredores de Veracruz y el saneamiento de Quintana Roo requieren atender estas desigualdades.

La justicia distributiva exige evitar que la seguridad privada de determinados usuarios se construya a costa de la vulnerabilidad pública. Un hotel, industria o mina puede financiar infraestructura propia, pero su operación no debe reducir el acceso de las comunidades, deteriorar las fuentes ni trasladar costos de tratamiento a la población.

La justicia procedimental requiere participación efectiva. Las comunidades deben intervenir desde la definición del problema y no solamente cuando el proyecto ya se encuentra diseñado. La información, la asesoría técnica y los recursos para participar son necesarios para reducir las diferencias de poder.

La justicia de reconocimiento implica respetar conocimientos, identidades, prácticas productivas y relaciones culturales con el agua. Los pesca-

dores de Chapala, las comunidades cercanas al Atoyac, los habitantes del sur de Veracruz y las poblaciones vinculadas con cenotes y acuíferos costeros poseen conocimientos que pueden mejorar el diagnóstico y la evaluación.

La resiliencia exige anticipación y aprendizaje

La novena conclusión es que la gestión hídrica debe prepararse para condiciones cambiantes. Las sequías, inundaciones, huracanes, fallas de infraestructura y episodios de contaminación pueden interrumpir simultáneamente el abastecimiento, el tratamiento y la producción.

Los protocolos de emergencia deben establecer prioridades, reducciones escalonadas, fuentes de respaldo, comunicación y responsabilidades. El consumo humano debe mantener prioridad y las empresas deben definir anticipadamente cómo ajustarán sus operaciones durante periodos críticos.

La resiliencia también requiere redundancia y mantenimiento. Las plantas necesitan energía de respaldo, almacenamiento y procedimientos de contingencia. Los sistemas de reúso deben contar con mecanismos para suspender el suministro cuando la calidad se deteriore, sin convertir las fuentes convencionales de respaldo en una vía permanente para ampliar el consumo.

La adaptación debe sustentarse en monitoreo y aprendizaje. Los proyectos requieren evaluaciones periódicas y capacidad para modificar tecnologías, contratos o metas. Mantener una intervención ineficaz únicamente porque ya recibió inversión prolonga los costos y retrasa las soluciones.

Hacia un modelo multiescalar de gestión sostenible

Los diez capítulos permiten proponer un modelo general organizado en cuatro escalas. La primera es la instalación, donde se desarrollan los balances, la eficiencia, el mantenimiento, la prevención y el tratamiento. La segunda corresponde a la cadena productiva, en la que se gestionan proveedores, materias primas, servicios y requisitos ambientales.

La tercera escala es el corredor, parque, distrito o sistema urbano, donde pueden compartirse infraestructura, redes, tratamiento, monitoreo y financiamiento. La cuarta es la cuenca o el acuífero, donde se evalúa la sostenibilidad territorial, la distribución de beneficios y la evolución de las fuentes.

Una acción solamente puede considerarse sostenible cuando sus beneficios en una escala no provocan impactos superiores en otra. La eficiencia de una parcela no debe aumentar el consumo del distrito; el reúso de una industria no debe mantener intactas sus extracciones; y la seguridad de un corredor turístico no debe construirse a costa de las comunidades.

El modelo debe apoyarse en ocho componentes transversales: diagnóstico territorial, responsabilidad individual, prevención, tecnología apropiada, colaboración, financiamiento transparente, monitoreo independiente y justicia hídrica.

El diagnóstico define las condiciones y prioridades. La responsabilidad individual establece quién debe actuar y financiar. La prevención reduce el consumo y la contaminación en el origen. La tecnología proporciona instrumentos compatibles con el contexto.

La colaboración articula capacidades para atender problemas compartidos. El financiamiento distribuye costos y riesgos sin socializar indebidamente las obligaciones privadas. El monitoreo verifica resultados y permite ajustes. La justicia orienta la distribución de beneficios y protege los derechos.

Consideración final

La gestión sostenible del agua no consiste únicamente en garantizar volúmenes para mantener el crecimiento económico. Implica adaptar la producción, las ciudades y la infraestructura a los límites de las fuentes. En determinados territorios será posible ampliar actividades mediante eficiencia, reúso y circularidad; en otros será necesario modificar cultivos, procesos, localizaciones o ritmos de expansión.

Las empresas tienen un papel relevante, pero no pueden asegurar su futuro de manera aislada. Su competitividad depende de la estabilidad de las cuencas, la calidad de la infraestructura pública, la confianza social y la

fortaleza de las instituciones. La seguridad hídrica empresarial se encuentra vinculada con la seguridad hídrica territorial.

El Estado debe fortalecer su capacidad de planeación, supervisión y sanción. La sociedad necesita información y espacios efectivos para participar. Las instituciones científicas deben contribuir con evidencia independiente. La cooperación será útil cuando se construya sobre estas responsabilidades y no cuando pretenda reemplazarlas.

La sostenibilidad hídrica requiere transformar las relaciones entre producción, territorio e instituciones. Su éxito no se medirá por el número de obras, el monto de inversión o los compromisos anunciados, sino por la reducción sostenida de extracciones y contaminantes, la recuperación de los ecosistemas y la garantía efectiva del derecho humano al agua.

Epílogo



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.10.02>

El agua acompaña todas las formas de desarrollo y, al mismo tiempo, establece sus límites. Ninguna ciudad, empresa, cultivo, mina, corredor industrial o destino turístico puede sostenerse cuando las fuentes que lo abastecen pierden su capacidad de renovación o se convierten en receptores permanentes de contaminación.

Durante mucho tiempo, la abundancia aparente permitió considerar el agua como un insumo disponible para acompañar el crecimiento. Cuando una fuente comenzaba a ser insuficiente, se perforaban nuevos pozos, se construían acueductos o se buscaban territorios más lejanos. Cuando las descargas aumentaban, se confiaba en la dilución o se construían plantas cuya operación no siempre recibía la misma atención que su inauguración.

Ese modelo ha comenzado a mostrar sus límites. Las crisis de abastecimiento, la sobreexplotación, la contaminación de ríos y acuíferos, los conflictos territoriales y los efectos del cambio climático revelan que el agua no puede gestionarse como un recurso separado de los ecosistemas, las comunidades y las decisiones económicas.

Los casos analizados en esta obra muestran distintos rostros de una misma transformación necesaria. Nuevo León recuerda que la industria no puede depender de una infraestructura diseñada para condiciones del pasado. Baja California advierte que la tecnología puede producir nuevas fuentes, pero también nuevos costos y riesgos. Sonora muestra que la prevención y la reparación son condiciones de la legitimidad minera.

Chihuahua demuestra que la eficiencia aparente puede aumentar el consumo cuando no existen límites territoriales. Guanajuato y Querétaro muestran

que la circularidad y el reúso pueden modificar la relación entre agua y producción. Chapala enseña que ninguna intervención local puede sustituir la gobernanza de una cuenca compartida.

El río Atoyac recuerda las consecuencias de normalizar durante décadas la descarga de costos ambientales hacia las comunidades. Veracruz muestra que los grandes corredores industriales deben transformar no solamente sus procesos productivos, sino también la manera en que se relacionan con el territorio. Quintana Roo evidencia que un modelo turístico pierde viabilidad cuando compromete el acuífero y los ecosistemas que sustentan su atractivo.

Estas experiencias no conducen a rechazar el desarrollo económico ni la participación empresarial. Por el contrario, muestran que la prosperidad de largo plazo depende de instituciones capaces de proteger las fuentes, empresas dispuestas a modificar sus prácticas y sociedades con información suficiente para intervenir en las decisiones.

La tecnología seguirá ocupando un lugar importante. Las membranas, la desalación, los sensores, el reúso, la automatización y las soluciones basadas en la naturaleza ampliarán las posibilidades de gestión. Sin embargo, ninguna innovación elimina la necesidad de decidir quién utiliza el agua, cuánto puede extraerse, qué calidad debe devolverse y qué riesgos son aceptables.

Esas decisiones son políticas, económicas y éticas. Determinan qué territorios reciben inversiones, qué comunidades soportan impactos y qué actividades continúan durante una crisis. Por ello, la gestión del agua no puede delegarse enteramente a especialistas, operadores o mercados. Requiere deliberación pública, conocimiento científico y participación social.

Las alianzas entre gobiernos y empresas pueden contribuir a resolver problemas que demandan grandes inversiones y capacidades técnicas. Pero una alianza no debe juzgarse por su nombre ni por la magnitud del capital movilizado. Su valor depende de los resultados, la transparencia, la distribución de riesgos y la protección de los derechos.

La acción colectiva empresarial también puede generar beneficios. Las compañías comparten fuentes, infraestructura, proveedores y riesgos. La colaboración puede reducir costos, acelerar la innovación y financiar proyectos territoriales. Sin embargo, pierde legitimidad cuando sustituye el

cumplimiento, concentra las decisiones o convierte la sostenibilidad en una estrategia de comunicación.

El desafío consiste en construir una relación distinta con el agua. Esta relación debe comenzar con el reconocimiento de que las fuentes poseen límites, los ecosistemas requieren volúmenes y calidad, y las comunidades tienen derechos que no pueden subordinarse a la rentabilidad de corto plazo.

Las empresas necesitan pasar de la administración de consumos internos a la comprensión de su dependencia territorial. Las autoridades deben transitar desde la reacción ante las crisis hacia la planeación y prevención. La sociedad debe dejar de ser considerada una receptora pasiva de decisiones técnicas.

La transición no será inmediata ni exenta de conflictos. Modificar tarifas, restringir extracciones, exigir tratamiento, transformar cultivos o revisar proyectos de expansión afecta intereses establecidos. Sin embargo, posponer estas decisiones aumenta los costos y reduce las alternativas futuras.

El agua obliga a pensar en plazos que superan los ciclos políticos, financieros y empresariales. Un acuífero puede tardar décadas en recuperarse; un contaminante puede permanecer durante generaciones; y una infraestructura mal diseñada puede comprometer recursos públicos por varios años. La responsabilidad debe medirse con esa perspectiva.

La sostenibilidad no significa detener toda actividad, sino aprender a producir, habitar y decidir dentro de límites verificables. Significa reconocer que la eficiencia debe traducirse en ahorro real, que el reúso debe sustituir extracciones, que la inversión debe generar valor público y que la colaboración debe ampliar la capacidad colectiva.

Al finalizar esta obra permanece una idea fundamental: el futuro del agua no depende exclusivamente de cuánto recurso exista, sino de la calidad de las decisiones que se adopten. México posee conocimientos, instituciones, empresas y comunidades capaces de transformar su gestión hídrica. Lo que se requiere es convertir esas capacidades dispersas en responsabilidades claras, información compartida y compromisos de largo plazo.

El agua conecta territorios, sectores y generaciones. Lo que se extrae, contamina o conserva en el presente condiciona las posibilidades de quienes vendrán después. Gestionarla sosteniblemente es, en última instancia, una

forma de decidir qué desarrollo se desea construir y qué relación se pretende mantener con el territorio.

La obra concluye, pero el desafío permanece abierto. Cada cuenca, acuífero, empresa y comunidad deberá transformar los principios aquí discutidos en decisiones concretas. El resultado dependerá de que la responsabilidad prevalezca sobre la simulación, la cooperación sobre la fragmentación y la visión de largo plazo sobre la urgencia inmediata.

Sobre los autores

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel

Doctor en Ciencias Administrativas, maestro en Administración y licenciado en Administración Industrial por el Instituto Politécnico Nacional. Profesor de la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás (ESCA-ST), del Instituto Politécnico Nacional. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI), nivel 1, e integrante de la Red de Investigadores Sociales sobre el Agua (RISSA). Sus líneas de investigación son la gestión del agua, el tratamiento de aguas residuales, la sostenibilidad y la gestión de recursos.

Últimas tres publicaciones principales:

1. Silva, J. A. (2026). AI solutions for improving sustainability in water resource management. *Sustainability*, 18(4), 2154. <https://doi.org/10.3390/su18042154>
2. Muñoz-Sánchez, C., Menéndez-García, J., Silva, J. A., Garza-Reyes, J. A., Monroy-Becerril, D. M., y Hakizimana, E. (2026). Blockchain technology and maritime logistics: A systematic literature review. *Logistics*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/logistics10010012>
3. Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2025). *Métodos sostenibles de tratamiento de agua para mejorar la competitividad en el sector farmacéutico*. Altres Costa-Amic Editores. ISBN 978-607-8878-72-7.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197809938>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=9N6rHcgAAAAJyhl=en>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Alejandro-Silva-Rodriguez-De-San-Miguel>

Dulce María Monroy Becerril

Doctora en Administración Pública, maestra en Relaciones Interinstitucionales, especialista en Prospectiva y licenciada en Administración de Empresas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI). Ha cursado diversos diplomados, entre los que destacan Formación Tecnológico-Ambiental para la Sustentabilidad; Bases didácticas para la docencia en el IPN; Desarrollo de competencias para la integración social del IPN; Escenarios electorales: una visión prospectiva; y Estrategia de comunicación prospectiva. Cuenta con más de once años de experiencia en el Instituto Politécnico Nacional, donde ha ocupado cargos como jefa de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, jefa del Departamento de Investigación y coordinadora de la Maestría en Administración de Empresas para la Sustentabilidad en la ESCA-Santo Tomás, además de otras responsabilidades en el área central del Instituto. Ha desarrollado proyectos institucionales de investigación, participado en redes de colaboración del IPN y presentado conferencias y ponencias en congresos nacionales e internacionales. Es autora de artículos de investigación y capítulos de libro, y ha dirigido trabajos de licenciatura y posgrado.

Últimas tres publicaciones principales:

1. Martínez Rodríguez, M. C., y Monroy Becerril, D. M. (Coords.). (2026). *Factores clave que influyen en la política industrial verde en México*. Comunicación Científica. <https://doi.org/10.52501/cc.370>
2. Martínez Rodríguez, M. C., y Monroy Becerril, D. M. (Coords.). (2026). *Enfoques de las dimensiones complejas y desafiantes de la crisis climática*. Comunicación Científica. <https://doi.org/10.52501/cc.251>
3. Muñoz-Sánchez, C., Menéndez-García, J., Silva, J. A., Garza-Reyes, J. A., Monroy-Becerril, D. M., y Hakizimana, E. (2026). Blockchain technology and maritime logistics: A systematic literature review. *Logistics*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/logistics10010012>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57224399366y>
origin=resultslst

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Dulce-Monroy>

Academia: <https://independent.academia.edu/DulceMaríaMonroyBecerril>

Christian Muñoz Sánchez

Doctor en Ciencias Administrativas por la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás, del Instituto Politécnico Nacional. Graduado con distinción *cum laude* y doctor en Ciencias Sociales, con orientación en Economía y Gestión de la Innovación, por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Es maestro en Ciencias en Administración y licenciado en Administración Industrial por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente se desempeña como coordinador de la Maestría en Ciencias en Administración en la ESCA. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del SECIHTI, nivel candidato. Sus líneas de investigación se centran en los estudios de innovación y sustentabilidad, las capacidades tecnológicas, los sistemas tecnológicos complejos, la administración de operaciones, la excelencia operacional y las transiciones sustentables. Es miembro activo de la Industrial Engineering and Operations Management Society International y de la Red de Medio Ambiente (REMA) del Instituto Politécnico Nacional.

Últimas tres publicaciones principales:

1. Garza-Reyes, J. A., Khassen, M., Roy Ghatak, R., Joshi, R., Muñoz Sánchez, C., y Kandasamy, J. (2026). Operational performance implications of circular economy implementation: An empirical exploration in the manufacturing sector. *Business Strategy and the Environment*, 1-28. <https://doi.org/10.1002/bse.70635>
2. Muñoz-Sánchez, C., Menéndez-García, J., Silva, J. A., Garza-Reyes, J. A., Monroy-Becerril, D. M., y Hakizimana, E. (2026). Blockchain technology and maritime logistics: A systematic literature review. *Logistics*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/logistics10010012>
3. Hakizimana, E., Monroy Becerril, D. M., Muñoz-Sánchez, C., y Martínez Díaz, E. (2025). Bargaining power of buyers' collectivism to enhance sustainability development. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 14(3), 13-29. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2025v14i3.7095>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57209292143>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Christian_Munoz11

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=Ulhvbe-kAAAAJ>

Eugene Hakizimana

Doctor en Ciencias Económicas, maestro en Política y Gestión del Cambio Tecnológico y licenciado en Administración de Empresas con especialidad en Finanzas. Su experiencia profesional comprende el análisis crediticio, la asesoría a pequeñas empresas, la tutoría y el análisis de inversiones. Sus líneas de investigación se centran en los sistemas complejos, las instituciones, la innovación y la sostenibilidad. Actualmente se desempeña como profesor-investigador de la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás, del Instituto Politécnico Nacional, donde participa en la Maestría en Administración de Empresas para la Sustentabilidad.

Últimas tres publicaciones principales:

1. Muñoz-Sánchez, C., Menéndez-García, J., Silva, J. A., Garza-Reyes, J. A., Monroy-Becerril, D. M., y Hakizimana, E. (2026). Blockchain technology and maritime logistics: A systematic literature review. *Logistics*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/logistics10010012>
2. Hakizimana, E., Muñoz-Sánchez, C., Monroy Becerril, D. M., y Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2025). Ecosystem of goods and value creation. *International Seven Journal of Multidisciplinary*, 4(6), e8460. <https://doi.org/10.56238/isevmjv4n6-001>
3. Hakizimana, E., Monroy Becerril, D. M., Muñoz-Sánchez, C., y Martínez Díaz, E. (2025). Bargaining power of buyers' collectivism to enhance sustainability development. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 14(3), 13-29. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2025v14i3.7095>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1804-1516>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57192373996>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Hakizimana-Eugene-2>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=MzUGjv-QAAAAJyhl=en>

Academia: <https://ipn.academia.edu/EugeneHakizimana>

Gestión sostenible del recurso hídrico en México.
Estrategias empresariales y alianzas público-privadas, de Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel,
Dulce María Monroy Becerril, Christian Muñoz Sánchez
y Eugene Hakizimana (coordinadores), publicado por Ediciones
Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de editar para su
publicación en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB
y HTML.

Formación: Juliana Avendaño López

Esta obra analiza los desafíos y las alternativas para la gestión sostenible del agua en diez entidades federativas de México, con énfasis en la responsabilidad empresarial y la colaboración público-privada. Mediante investigaciones teóricas y documentales, se examinan el riesgo hídrico industrial en Nuevo León; la desalación en Baja California; la minería en Sonora; la eficiencia agroindustrial en Chihuahua; la economía circular en Guanajuato; el reúso industrial en Querétaro; la acción colectiva en torno al lago de Chapala; el saneamiento del río Atoyac; la gestión circular en los corredores petroquímicos de Veracruz; y la relación entre turismo y saneamiento en Quintana Roo. Los siguientes capítulos muestran que la infraestructura y la innovación tecnológica son insuficientes sin regulación, medición, transparencia, participación social y protección de los ecosistemas. La obra propone modelos de gobernanza territorial que articulan prevención, eficiencia, reúso, recuperación de recursos, financiamiento, monitoreo independiente y distribución clara de responsabilidades. Se concluye que la participación privada puede fortalecer la seguridad hídrica cuando complementa —y no sustituye— la rectoría pública, produce beneficios verificables para las cuencas y garantiza el derecho humano al agua.



Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor-Investigador de la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás (ESCA-ST), del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadores (SNII), e integrante de la Red de Investigadores Sociales sobre el Agua (RISSA).



Dulce María Monroy Becerril Doctora en Administración Pública. Profesora-Investigadora de la ESCA-ST, del IPN. Miembro del SNII. Ha desarrollado proyectos institucionales de investigación, participado en redes de colaboración del IPN y presentado conferencias y ponencias en congresos nacionales e internacionales.



Christian Muñoz Sánchez Doctor en Ciencias Administrativas. Se desempeña como coordinador de la Maestría en Ciencias en Administración en la ESCA. Es miembro del SNII. Integrante de la Industrial Engineering and Operations Management Society International y de la Red de Medio Ambiente (REMA) del IPN.



Eugene Hakizimana Doctor en Ciencias Económicas. Profesor-Investigador de la ESCA-ST, del IPN. Sus líneas de investigación se centran en los sistemas complejos, las instituciones, la innovación y la sostenibilidad.

EBSCO

RENIECYT
Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas
2000922



DOI.ORG/10.52501/CC.493

ISBN: 978-968-9803-42-3



9 789689 803423



**EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
comunicacion-cientifica.com