

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; Morseletto 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 (Morseletto 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., Rodríguez, 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>