# 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 (Olivares-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 (Olivares-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; Morseletto 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 (Morseletto 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 electrodesionización 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 auditables 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=5645374yfecha=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 Gernaey, 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