

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, cacahuate 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>