

REVISTA DE

EL COLEGIO DE SAN LUIS

Nueva época • año XIV, 25 • enero a diciembre de 2024

Las paradojas de la eficiencia de
riego asociadas a la tecnificación
de zonas de riego
Cuentos y cuentas

The Paradoxes of Irrigation Efficiency Linked
to the Modernization of Irrigated Zones
Tales and Tallies

Waldo Ojeda Bustamante

Jacinta Palerm Viqueira

Francisco Muñoz-Arriola

Revista multidisciplinaria enfocada
en las Ciencias Sociales y las Humanidades

REVISTA DE
EL COLEGIO DE SAN LUIS

DIRECTOR

Luis Ángel Mezeta Canul

CONSEJO CIENTÍFICO (2021-2024)

Flavia Daniela Freidenberg Andrés, *Universidad Nacional Autónoma de México*

Aurelio González Pérez †, *El Colegio de México*

Alejandro Higashi, *Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa*

Jennifer L. Jenkins, *The University of Arizona*

Silvia Mancini, *Université de Lausanne*

Juan Ortiz Escamilla, *Universidad Veracruzana*

Elodie Razy, *Université de Liège*

Antonio Saborit, *Instituto Nacional de Antropología e Historia*

Martín Sánchez Rodríguez, *El Colegio de Michoacán*

Maria Cristina Secci, *Università degli Studi di Cagliari*

Pedro Tomé Martín, *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

Ricardo Uvalle Berrones, *Universidad Nacional Autónoma de México*

Rosa Gabriela Vargas Cetina, *Universidad Autónoma de Yucatán*

COMITÉ EDITORIAL

Neyra Alvarado

Agustín Ávila

Sergio Cañedo

Javier Contreras

Julio César Contreras

Norma Gauna

José A. Hernández Soubervielle

Marco Chavarín

EDICIÓN

Estrella Ortega Enríquez / *Jefa de la Unidad de Publicaciones*

Diana Alvarado / *Asistente de la dirección de la revista*

Pedro Alberto Gallegos Mendoza / *Asistente editorial*

Adriana del Río Koerber / *Corrección de estilo*

COORDINADOR DE ESTE NÚMERO

Luis Ángel Mezeta Canul

DISEÑO DE MAQUETA Y PORTADA

Ernesto López Ruiz



PRESIDENTE

David Eduardo Vázquez Salguero

SECRETARIO ACADÉMICO

José A. Hernández Soubervielle

SECRETARIO GENERAL

Jesús Humberto Dardón Hernández



La Revista de El Colegio de San Luis, nueva época, año XIV, número 25, enero a diciembre de 2024, es una publicación continua editada por El Colegio de San Luis, A. C., Parque de Macul 155, Fraccionamiento Colinas del Parque, C. P. 78294, San Luis Potosí, S. L. P. Tel.: (444) 8 11 01 01. www.colsan.edu.mx, correo electrónico: revista@colsan.edu.mx. Director: Luis Ángel Mezeta Canul. Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2014-030514290300-203 / ISSN-E: 2007-8846.

D. R. Los derechos de reproducción de los textos aquí publicados están reservados por la Revista de El Colegio de San Luis. La opinión expresada en los artículos firmados es responsabilidad del autor.

Los artículos de investigación publicados por la *Revista de El Colegio de San Luis* fueron dictaminados por evaluadores externos por el método de doble ciego.

LAS PARADOJAS DE LA EFICIENCIA DE RIEGO ASOCIADAS A LA TECNIFICACIÓN DE ZONAS DE RIEGO CUENTOS Y CUENTAS

The Paradoxes of Irrigation Efficiency Linked to the Modernization of Irrigated Zones

Tales and Tallies

WALDO OJEDA BUSTAMANTE*

JACINTA PALERM VIQUEIRA**

FRANCISCO MUÑOZ-ARRIOLA***

RESUMEN

La agricultura de riego es el mayor consumidor de agua en el mundo. La tecnificación de la irrigación recurrentemente forma parte de las políticas públicas subsidiadas para ahorrar agua y ser transferida a otros sectores, como es el caso del proyecto Agua Saludable para La Laguna, en el norte de México. El objetivo de este artículo es revisar las bases científicas y los estudios en los que las paradojas de la eficiencia de riego, hidrológica y de Jevons, se relacionan con la tecnificación de zonas de riego. Se plantea el principio de que eficientizar el riego es una acción bien intencionada; sin embargo, la tecnificación del riego puede producir el efecto contrario al ahorro y fomentar un incremento de la extracción de agua a través de múltiples escalas hidrológicas. Datos hidrológicos y agronómicos preliminares en la Comarca Lagunera indican que la resolución de ambas paradojas requiere de un nuevo marco conceptual sustentado en un análisis riguroso de los flujos de agua superficiales y subterráneos que integre los efectos de la tecnificación de la zona de riego, desde la parcela hasta la cuenca hidrológica.

PALABRAS CLAVE: EFECTO REBOTE, USO SUSTENTABLE DEL AGUA, MODERNIZACIÓN DEL RIEGO, AHORRO DE AGUA, SUBSIDIOS PARA INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA.

* Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Correo electrónico: w.ojeda@riego.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7183-9637>

** Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Correo electrónico: jacinta.palerm@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5499-9791>

*** University of Nebraska-Lincoln. Correo electrónico: fmunoz@unl.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-6766>

ABSTRACT

Irrigated agriculture is the largest user of water globally. The modernization of irrigation is frequently part of public subsidy policies to save water and be transferred to other sectors. Such is the case of the “Healthy Water for La Laguna” project in Northern Mexico. Here, we review the scientific bases and studies where the paradoxes of irrigation efficiency: hydrological and of Jevons, are related to the modernization of agricultural irrigation areas. Although improving irrigation efficiency is well-intentioned, its implementation can generate the opposite effect of savings, promoting increased water extraction across multiple hydrological scales. Preliminary data indicate that solving both paradoxes require a new conceptual framework based on rigorously analyzing surface and underground water flows and integrating the effects of irrigation technology in the La Laguna region from the plot to the hydrological basin.

KEYWORDS: REBOUND EFFECT, WATER SUSTAINABILITY, IRRIGATION MODERNIZATION, WATER SAVING, IRRIGATION INFRASTRUCTURE SUBSIDIES.

Fecha de recepción: 27 de octubre de 2023.

Dictamen 1: 5 de enero de 2024.

Dictamen 2: 5 de febrero de 2024.

Dictamen 3: 8 de febrero de 2024.

<https://doi.org/10.21696/rcsl142520241598>

INTRODUCCIÓN

En la década de 1990 se popularizó como política pública agrícola la tecnificación de zonas de riego para la generación de un mayor caudal ecológico y para la transferencia de agua hacia otros sectores no agrícolas (EC, 2012; EC, 2015a; EC, 2015b). Aunque se ha promovido un acercamiento de los gobiernos con el sector científico para analizar, opinar y apoyar la generación de políticas basadas en la ciencia, dicho acoplamiento política-ciencia ha sido lento en la toma de decisiones de políticas públicas y su instrumentación basada en evidencias científicas (Von Schneidemesser *et al.*, 2020; Pérez-Blanco *et al.*, 2020).

En México, los gobiernos federal y estatal, y algunas veces el municipal, han subsidiado de modo recurrente la tecnificación del riego enfocándose en el reemplazo de los sistemas de aplicación del riego parcelario, en mayor medida de riego por gravedad (por ejemplo, por surcos o melgas), por sistemas más eficientes como los sistemas presurizados por aspersión o microirrigación. Asimismo, se han promovido obras para la reducción de la percolación de agua en canales de tierra entubándolos y revistiéndolos con materiales impermeables (Pisanty, 2003). Usualmente subsidiada por el Estado, esta estrategia “modernizadora” de zonas de riego de producir “más con la misma gota” ha sido muy común en España y otros países (Tarjuelo *et al.*, 2015; Grafton *et al.*, 2018; Banda *et al.*, 2019), y en ocasiones se complica al incorporar nuevas tecnologías (Shekhar *et al.*, 2017; Romanelli *et al.*, 2022).

El proceso de tecnificación ha sido visto como una de las soluciones más “sustentables” para el uso del agua de riego, debido al incremento en la eficiencia de aplicación parcelaria y en la de conducción en las redes de distribución y abastecimiento en las zonas de riego. De hecho, había existido un “consenso”, de naturaleza ingenieril principalmente, entre los tomadores de decisiones y administradores de políticas hídricas nacionales de que realizando un uso más eficiente del agua en la agricultura de riego se obtendrían volúmenes “ahorrados”, que a la postre podrían tener un uso ecológico o urbano-industrial alterno.

Históricamente, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y sus antecesoras han apoyado la modernización de distritos y unidades de riego a través de diferentes programas de tecnificación parcelaria y modernización de la infraestructura hidroagrícola en México. Bajo esta premisa, la CONAGUA apoyó la modernización de varios distritos de riego (DR), por ejemplo, del DR001 “Pabellón, Aguascalientes” y del DR005 “Delicias, Chihuahua”.

Últimamente, se tiene en desarrollo la tecnificación del riego en el Distrito de Riego 017 “Comarca Lagunera, Coahuila-Durango”, como parte del programa federal de Agua Saludable para La Laguna (ASLL). Sin embargo, el ahorro de agua esperado como producto de la tecnificación de la zona de riego y su uso potencial para subsanar el déficit hídrico de las zonas urbanas pueden impactar los acuíferos y las corrientes superficiales en respuesta al revestimiento/entubamiento de canales y la tecnificación parcelaria.

De esta manera, el objetivo es analizar los modos en que la tecnificación del riego y la gestión de los recursos hídricos no solo deben integrar aspectos técnicos y productivos del riego a escala parcela, sino también considerar un enfoque hidrológico a escala zona de riego y cuenca que incluya los efectos en los flujos superficiales y subterráneos más allá de la parcela.

Existe un número creciente de evidencias empíricas en diversas partes del mundo de un conflicto entre la tecnificación de una zona de riego y la conservación del agua. Aunque bien intencionadas y de “interés público”, dichas intervenciones técnicas para el ahorro de agua pueden tener consecuencias no previstas y, muchas veces, producir efectos no deseables (Hoffmann y Villamayor-Tomas, 2023; Pérez-Blanco *et al.*, 2021; Lonsdale *et al.*, 2020; Grafton y Wheeler, 2018).

Las primeras advertencias o críticas de la tecnificación de la irrigación se documentaron a escala cuenca, cuando se identificó que los retornos de riego abastecían a otros usuarios cuenca abajo (Willardson *et al.*, 1994; Seckler, 1996; Huffaker y Whittlesey, 1995). También se observó que se debería extremar la regulación a los agricultores para que el uso del agua ahorrada proveniente del incremento en la eficiencia de riego no sea considerado como un recurso hídrico adicional que motive un incremento del consumo de este, sino como un aliciente para la conservación de los recursos hídricos.

Los estudios empíricos resaltan otro efecto de la tecnificación: la paradoja de Jevons. Al aumento del consumo de agua resultante del uso de tecnologías para incrementar la eficiencia del riego también se le conoce como efecto rebote (Xiong *et al.*, 2021). La paradoja de Jevons o el efecto rebote conlleva el aumento de la extracción de agua de la fuente. Como fue dicho en los trabajos pioneros de Seckler (1996) y Perry (1999; 2007), la eficiencia económica del agua o la productividad hídrica pueden incrementarse al extraer más agua de las fuentes debido a una reconversión hacia cultivos de mayor valor económico por unidad de agua.

En esta misma vertiente, Huffaker y Whittlesey (1995) presentan un caso en que no se extrae más agua de la fuente de abastecimiento como producto de la

tecnificación del riego, pero aumenta el consumo “benéfico” del agua a costa de los retornos de riego. Grafton *et al.* (2018) muestran las similitudes de la paradoja de la eficiencia de riego con lo planteado por la paradoja de Jevons, que originalmente documentó el aumento del consumo de recursos naturales en respuesta a la mejora tecnológica en el uso y manejo de tales recursos.

En la última década se han publicado varios estudios sobre la paradoja de la eficiencia de riego en su variante hidrológica o de escala que relacionan el impacto de la tecnificación del riego en los procesos hidrológicos cuenca abajo de la intervención tecnológica. La integración de las paradojas de Jevons e hidrológica relaciona el posible aumento en superficies de riego o el cambio de cultivos con mayor demanda de agua con el incremento de la extracción de agua y la alteración de los procesos hidrológicos a escala cuenca. Pérez-Blanco *et al.* (2020) reportan más de 200 artículos en que se estudian ambas paradojas de forma aislada o concurrente.

Algunas de las primeras incorporaciones de los estudios de la paradoja de Jevons a las políticas públicas fueron hechas por la Comunidad Europea (EC, 2012; EC, 2015a). En aquel entonces se alertó sobre la presencia del efecto rebote y, asumiendo una analogía con la economía de la energía, se promovió la adopción del “precio del agua” como una solución a la presencia de tal efecto. Aunque los autores indican que es necesario tomar precauciones con dicha analogía por la diferencia que existe entre agua y energía (EC, 2012).

También la Comunidad Europea (EC, 2015b) resalta la importancia de la paradoja hidrológica al recomendar que la inversión en programas relacionados con la eficiencia del agua debe considerar una estimación precisa de los balances del agua a escala parcela, cuenca y acuífero, incluyendo los intercambios y la dinámica de los flujos de aguas superficiales y subterráneas y el impacto en los ecosistemas dependientes del agua subterránea.

El escrutinio del avance tecnológico aplicable a grandes zonas de riego es un crítico arduo de la tecnificación. Por ejemplo, Pérez-Blanco *et al.* (2021) catalogan drásticamente las tecnologías de ahorro de agua para uso agrícola como ideas “*zombie*” y concluyen que antes de subsidiar la tecnificación de zonas de riego se debe analizar la factibilidad y el desempeño de rutas de transformación institucional y de políticas que en efecto resulten en el ahorro del agua; además, de ser necesario, erradicar el concepto simplista de incremento en la eficiencia del riego.

Para conocer la factibilidad de la tecnificación de las zonas de riego es necesaria una revisión más profunda acerca del manejo del agua y las características sociohidrológicas de las zonas agrícolas del país, así como su conectividad con

otros sistemas productivos y ambientales. En este artículo se revisan estudios de diversas partes del mundo a fin de documentar cómo la mejora en la eficiencia del riego, usualmente promovida y subsidiada por el Estado, resulta en un mayor uso del agua, y que actúa en detrimento del abastecimiento y la distribución de los recursos hídricos.

Es vital conocer cuáles son los impactos y las lecciones aprendidas de dichas intervenciones tecnológicas para incrementar las eficiencias del riego no solo a escala parcela, sino también zona de riego, cuenca superficial y acuífero subterráneo. Bajo estas consideraciones, y de disponer de más agua útil para la agricultura o la liberación de agua hacia otros sectores, se deben plantear las siguientes preguntas: ¿hacia dónde van las “pérdidas” de agua asociadas a las redes de conducción de agua y aplicación del riego a escala parcela? y ¿cómo deben incorporarse las acciones de tecnificación de zonas de riego en el manejo y la conservación del agua y la preservación de los procesos hidrológicos?

El presente estudio tiene como objetivos (1) hacer una revisión de literatura sobre la tecnificación de la irrigación como política de Estado en el mundo, (2) retomar las definiciones y bases de la paradoja de la eficiencia de riego que engloba la paradoja de Jevons o efecto rebote y la paradoja hidrológica o de escala para evidenciar la surgencia de fenómenos antagónicos como el deterioro de la hidrología regional a causa de la tecnificación y la intensificación en el uso del agua y (3) analizar los posibles cambios en los flujos hidrológicos en el área de influencia del Distrito de Riego 017 “Comarca Lagunera” como respuesta a la tecnificación subsidiada a escala parcela y red de distribución para “ahorrar” agua y cederla a los centros urbanos para dotarlos de agua superficial en el marco del proyecto ASLL.

La tecnificación de zonas de riego como política de Estado

Históricamente, en México los diferentes niveles de gobierno han subsidiado obras para incrementar la eficiencia de riego en zonas agrícolas. El Programa Nacional Hídrico 2020-2024 (SEMARNAT, 2022) tiene como objetivo prioritario “aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos”. Además, contempla la conservación, la rehabilitación y la modernización de la infraestructura hidroagrícola de los distritos y unidades de riego para incrementar la productividad, reducir las pérdidas de agua y evitar la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento. Así, la CONAGUA (2023a) opera anualmente el Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola S217 que,

con subsidio federal y estatal, proyecta obras para la rehabilitación y tecnificación de la infraestructura hidroagrícola, incluyendo la red de distribución y sistemas de riego de los distritos y unidades de riego del país.

El financiamiento de las obras de infraestructura hidroagrícola para la mejora de la eficiencia de riego mediante un sistema de riego parcelario de alta eficiencia y el entubamiento y/o revestimiento de canales de riego son acciones promovidas y subsidiadas recurrentemente por el gobierno federal tanto para distritos de riego como para unidades de riego (CONAGUA, 2011; González Villarreal *et al.*, 2022). Los planes estatales como el Plan Hídrico Estatal 2021-2050 del estado de Aguascalientes (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2022), el *Plan Estatal Hídrico 2040* del estado de Chihuahua (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2022), el *Programa Hídrico del Estado de Morelos 2019-2024* (Gobierno del Estado de Morelos, s/f) y el *Programa Hídrico Integral del Estado de México 2017-2023* (Gobierno del Estado de México, 2018) incluyen acciones de tecnificación del riego.

El Consejo Consultivo del Agua, A. C., ha indicado que la agricultura es el gran “derrochador” de agua, ya que para Nuevo León esta actividad consume el 71 por ciento del agua disponible y desperdicia la mitad, comparativamente con la industria autoabastecida, que solo consume el cuatro por ciento del total (Flores, 2023). Así que existe un área de oportunidad para la innovación en el uso eficiente del agua en la agricultura (Shekhar *et al.*, 2017).

La aplicación de políticas basadas en evidencias científicas es ampliamente usada por gobiernos y organismos internacionales, lo cual ha incrementado la participación de la academia en la mejora de la toma de decisiones informadas. Se subsidia la tecnificación de grandes zonas de riego a escala parcela y red de distribución para generar ahorros de agua para transferirla a sectores no agrícolas (Del Conde y Fuentes, 2022; González Villarreal *et al.*, 2022; EC, 2012). Sin embargo, nuevas evidencias indican que dichas intervenciones públicas pueden producir consecuencias no previstas y, muchas veces, no deseables, como ha sido mostrado por numerosos investigadores en diferentes partes del mundo (Hoffmann y Villamayor-Tomas, 2023; Pérez-Blanco *et al.*, 2021; Lonsdale *et al.*, 2020; Grafton *et al.*, 2018). Sin duda, llama la atención la existencia de un desfase entre la toma de decisiones públicas y las evidencias científicas recientes.

El artículo 51 de la Ley de Aguas Nacionales establece que:

[...] los volúmenes ahorrados por el incremento en la eficiencia en el uso del agua no serán motivo de reducción de los volúmenes de agua concesionados, cuando las inversiones y la

modernización de la infraestructura y tecnificación del riego las hayan realizado los concesionarios, siempre y cuando exista disponibilidad.

Lo anterior ha agravado el problema de manejo y conservación del agua en las cuencas hidrológicas, ya que, al incrementar la eficiencia del agua, la concesión o dotación del recurso a un usuario de riego debería reducirse de modo simultáneo para que dicho ahorro de agua en la dotación sea liberado para otro sector.

El resto del artículo comprende la metodología, en la que se describe la síntesis bibliográfica, la representatividad de los esquemas tradicionales de irrigación y sus eficiencias de riego, además de su representatividad en las estimaciones de flujos de retorno a través de las escalas. Enseguida, en los resultados se sustenta la integración de las paradojas de riego en la toma de decisiones informadas y en la formulación de políticas para un manejo sociohidrológicamente comprometido con la actividad agrícola y el medio ambiente. Por último, se discute el caso de La Laguna y se exponen algunos hallazgos y recomendaciones a manera de conclusiones.

MÉTODOS

Síntesis bibliográfica

La compilación de artículos científicos se logró mediante una búsqueda en bases de datos usando las palabras clave en inglés “irrigation efficiency”, “rebound effect”, “Jevons’ paradox”, “efficiency paradox”, “consumption rebound” y “sustainable water use”. Después de generar una lista de más de 100 artículos, que incluye los publicados en los últimos veinte años, se localizaron las definiciones en torno a la eficiencia de riego y las paradojas de Jevons e hidrológica, así como su convergencia. Los casos de estudio reportados corresponden a diversas zonas agrícolas bajo riego en el mundo. Las síntesis bibliográficas también fueron consultadas para identificar las condiciones y las lecciones aprendidas que indican cómo debería realizarse el proceso de tecnificación integral de grandes zonas de riego, y que a su vez reciben subsidios gubernamentales, minimizando la discrepancia entre ambas paradojas.

Como estudio de caso, se consultó la información del Distrito de Riego 017 o Comarca Lagunera, localizado entre el noreste de Durango y el suroeste de Coahuila. En este Distrito se tiene en ejecución el megaproyecto ASLL (Del Conde y Fuentes, 2022), que tiene como propósito el ahorro de agua basado en la tecnificación de la zona de riego en la región norte de México. Este proyecto

busca sustituir la actual fuente de abastecimiento de agua, concentrada en pozos profundos, por agua superficial proveniente del río Nazas mediante diversas obras de infraestructura hidráulica que comprenden acueductos presurizados para llevar el agua desde una presa derivadora hacia una planta potabilizadora, tanques de almacenamiento y finalmente redes de distribución para la entrega del agua a usuarios en zonas urbanas. La sustitución del abastecimiento de agua subterránea por agua superficial responde a que en la actualidad el acuífero Principal-Región Lagunera exhibe un fuerte abatimiento y altas concentraciones de arsénico disuelto, lo cual representa un riesgo para la salud pública.

Se consultó información de las estaciones hidrométricas de las presas que abastecen al proyecto ASLL en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), disponible en el portal <https://www.imta.gob.mx/media/iframes/bandas.html>. Aunque es limitada la información pública del proyecto ASLL sobre las obras de mejora de la red de distribución y de los sistemas de riego parcelario del distrito de riego, en el presente estudio se hace un análisis preliminar de los posibles efectos de la concurrencia de la paradoja de Jevons y la paradoja hidrológica.

Las cuentas del agua en una zona de riego

La agricultura de riego es el mayor usuario del agua en México y en el mundo. La irrigación se ha percibido socialmente como una gran derrochadora de agua que debe eficientizar sus procesos de conducción, distribución y aplicación del riego. Entender el ahorro de agua a través de la mejora de la eficiencia del riego a escala parcela y zona de riego requiere primeramente conocer los diferentes componentes no solo del flujo del agua que circula a lo largo de la red de distribución y que se extrae de la fuente de abastecimiento para conducirlo hasta su punto de entrega a la parcela a escala toma granja, sino también de los flujos de agua que se presentan a escala parcelaria.

Históricamente, la evaluación del desempeño de un sistema de riego se ha asociado con el término de eficiencia. La eficiencia global de riego de una zona de riego se relaciona con la cantidad de agua que usan los cultivos con respecto del agua que se extrae de la fuente de abastecimiento. Esta última, puede ser una presa de almacenamiento, una toma directa de una corriente o manantial, o un pozo profundo.

Desde el punto de vista agronómico, el agua que circula en la red de distribución y se aplica a la parcela puede clasificarse en “benéfica” y “no benéfica”. El agua benéfica es aquella que sirve para mantener la producción de un cultivo desde el

punto de vista de producción y manejo agronómico. En el caso de la eficiencia a escala parcelaria, el agua que sostiene los procesos de evaporación del suelo, transpiración del cultivo, lavado y control de sales, evaporación durante el riego, agua estructural (que contienen los cultivos), control de heladas, enfermedades o plagas, mantenimiento de condiciones óptimas del suelo para la labranza y labores culturales se consideran benéficas.

A escala parcela, entre los procesos no beneficiosos para la conservación del agua destacan la transpiración de malezas, la evaporación del agua en el follaje o del agua almacenada sobre la superficie del suelo, el escurrimiento superficial y percolación fuera de la zona radical (ocasionados principalmente por riegos tardíos) y la baja uniformidad del riego o flujo preferencial en grietas o fracturas. Típicamente, la mejora en la conservación de agua se asocia al incremento de la eficiencia de riego producto de la conversión de los sistemas de riego tradicionales que aprovechan el desnivel de un terreno para aprovechar la energía de posición o potencial gravitacional que tienen para aplicar el agua en la parte alta (o zona de aplicación) y convertirse en energía cinética para avanzar a la parte baja del terreno e infiltrarse a la zona de raíces cuando el agua entra en contacto con el suelo.

Con el flujo de los procesos que se presentan a escala parcelaria (véase el gráfico 1) se puede reducir, incrementar, anular o generar otros flujos. Por ejemplo, al convertir el riego por gravedad a riego por goteo se reducen de manera drástica la evaporación del suelo, el escurrimiento superficial y la percolación profunda, que puede significar del 20 al 70 por ciento del agua aplicada con el riego por gravedad. Entonces, la tecnificación del riego por gravedad aparenta ser una oferta tentadora para el usuario y tomador de decisiones.

A continuación, se expone un análisis no parcelario detallando hacia dónde se remueve el agua “no benéfica” de los procesos productivos que se aplica en la parcela, pero antes se analizan los flujos en la red de distribución de una zona de riego. Para conocer más acerca de los conceptos mencionados en esta sección puede consultarse a Ojeda e Íñiguez (2015).

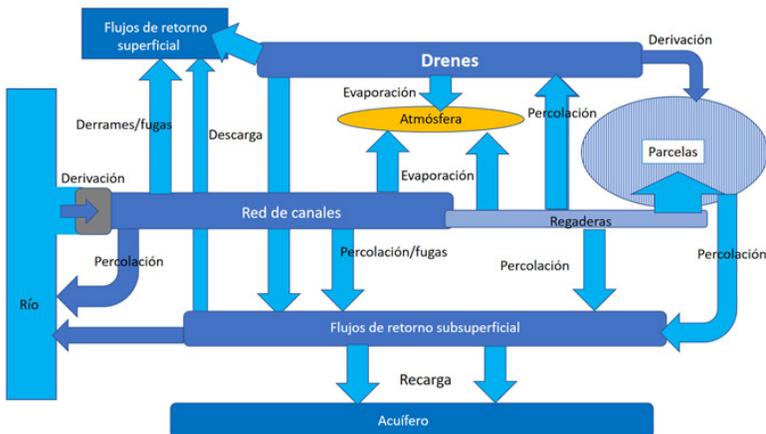
Llevar el agua de la fuente de abastecimiento, como puede ser una presa de almacenamiento o una presa derivadora, a través de una red de canales que abastecen las parcelas de riego a los puntos de entrega (tomas granjas) o de una red de canales que abastecen las parcelas de riego favorece el consumo de agua que no llega al punto de entrega o la parcela. Estos flujos de agua son recuperables a escala zona de riego, cuenca o acuífero, como el agua percolada o derramada de los canales; mientras que otros flujos como el agua evaporada de canales no son recuperables (véase el gráfico 2).

GRÁFICO 1. FLUJOS DE AGUA QUE SE PRESENTAN EN UN SISTEMA DE RIEGO PARCELARIO TRADICIONAL



Fuente: adaptado de Wang *et al.* (2018).

GRÁFICO 2. FLUJOS DE AGUA QUE SE PRESENTAN EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN POR CANALES ABIERTOS DE TIERRA



Fuente: adaptado de Wang *et al.* (2018).

Para integrar la irrigación y los flujos que ocurren a escala parcela y cuenca es indispensable tener un indicador de la eficiencia del riego a través de las escalas. Esto es, la zona objetivo es no solo la escala parcelaria, sino toda la zona del riego

que incluye la red de distribución del agua de la fuente de abastecimiento hasta su entrega a las parcelas o su agregación a escala de cuenca.

En este sentido, las pérdidas por escurrimiento superficial de una parcela pueden ser recuperadas aguas abajo y usarse para regar otras parcelas en lo que se conoce como coleos de riego o reúso de agua de drenaje superficial agrícola. Por ejemplo, cuando una porción de estos volúmenes no sale de la zona de riego puede ser reutilizada en la misma zona; pero cuando otra porción sale de la zona de riego puede alimentar corrientes superficiales o recargar acuíferos (véase el gráfico 2).

En una zona de riego, dichos flujos de agua son conocidos integralmente como retornos de riego y provienen tanto del riego parcelario como de la red de distribución y drenaje (o flujos) superficial o subterráneo. Los retornos de riego son los principales flujos afectados por los esquemas de tecnificación de los sistemas de riego parcelarios y el entubamiento o revestimiento de canales. Por ello, es indispensable conocer cómo estos esquemas de tecnificación repercuten de modo negativo tanto en los flujos de retorno como en la percolación de los canales o regaderas de riego.

A continuación, se enuncian las definiciones de eficiencia global de riego, de aplicación y de conducción con objeto de ilustrar los conceptos o flujos que considerar y la escala a la que son aplicables.

Definición de eficiencia del riego

La definición tradicional de eficiencia global de riego (e_g) es expresada como una relación del volumen de agua que consume el cultivo (V_c) con respecto del volumen extraído de la fuente de abastecimiento (V_e).

$$e_g = \text{Eficiencia global de riego} = \frac{\text{Volumen consumido por el cultivo}}{\text{Volumen extraído de la fuente}} = \frac{V_c}{V_e} \quad [1]$$

Dicha eficiencia global se expresa usualmente como el producto de las eficiencias en la aplicación (e_a) y la conducción (e_c). Esto es: $e_g = e_a e_c$.

La eficiencia de aplicación del riego simplifica los flujos indicados en el gráfico 1, y es expresada como una relación simple entre el agua que es consumida por el cultivo (V_c) y el agua total aplicada a la parcela (V_a) y almacenada en la zona de raíces.

$$e_a = \text{Eficiencia de aplicación} = \frac{\text{Volumen consumido por el cultivo}}{\text{Volumen total aplicado a la parcela}} = \frac{V_c}{V_a} \quad [2]$$

La definición de eficiencia de aplicación ha conducido a una percepción “simplista” sobre la diferencia entre ambas cantidades, considerada como “agua perdida” y que debe ser reducida o eliminada para generar “ahorros” de agua (Jensen, 2007). Altas eficiencias de aplicación del riego indican que la mayor parte del agua aplicada en los sistemas de riego “altamente” eficientes, como el riego por goteo o el riego por aspersión, se almacenan en las zonas de raíces de los cultivos. Las bajas eficiencias parcelarias sugieren que una parte importante del agua aplicada se mueve fuera de la zona objetivo del riego, esto es, sale de la zona radical. Por ello, la definición clásica de eficiencia de aplicación riego ha estado a debate, ya que no distingue entre uso consuntivo y uso no consuntivo.

El objetivo del riego es aplicar el agua consumida por el cultivo (uso consuntivo) y removida de la zona de riego por los procesos de evaporación y transpiración. En consecuencia, aumentar la eficiencia simplemente debería indicar que el uso consuntivo de los cultivos incrementa, ya que se acoplan mejor las demandas de los cultivos con la aplicación del riego (Perry, 2007). Por lo tanto, una mayor eficiencia puede indicar mayor demanda y mayor consumo de agua.

Es necesario resaltar que el agua consumida se refiere a la porción del agua extraída de las fuentes que fluye a escala parcela y que no puede ser reusada en la zona de riego, ya que (i) se liberó a la atmósfera por procesos evapotranspirativos, (ii) incrementó su salinidad a niveles no deseables, o (iii) se movió a localidades en donde no puede ser fácilmente utilizable. El agua no consumida se refiere al agua aplicada a la parcela que sale por flujos superficiales o subterráneos y que puede ser utilizada aguas abajo de la parcela o cuenca.

Llevar el agua desde la fuente de abastecimiento a la parcela se asocia con la eficiencia de conducción de la red de canales o tuberías. La eficiencia de conducción (e_c) simplifica los flujos indicados en el gráfico 2 y es expresada como una relación entre el agua total entregada para ser aplicada a la parcela (V_a) con respecto del volumen extraído de la fuente (V_e).

$$e_c = \text{Eficiencia de conducción} = \frac{\text{Volumen entregado a la parcela}}{\text{Volumen extraído de la fuente}} = \frac{V_a}{V_e} \quad [3]$$

Desde un punto de vista ingenieril, se considera que altos valores son deseables tanto para la eficiencia de conducción como de aplicación, ya que se asocian a “pérdidas” reducidas de agua en la parcela o en la red de distribución. Una eficiencia de conducción cercana al cien por ciento indicaría que todo el volumen de agua que se extrae de la

fuerza se entrega a la parcela para su aplicación usando el sistema de riego parcelario, como es el caso de redes por tuberías a presión. Además, se considera que hay una merma en la disponibilidad de recursos hídricos si los valores son bajos y, peor aún, existe la presunción de que al reducir dichas “pérdidas” se dispondrá del agua ahorrada para usos alternos, dentro o fuera de las zonas de riego. Por ello, ambas eficiencias de riego se toman a menudo como indicadores del desempeño de una zona de riego.

Con frecuencia, se recomienda la tecnificación del riego para modernizar una zona de riego y, así, incrementar la eficiencia de riego parcelaria o de conducción, o ambas (Van Halsema y Vincent, 2012). Sin embargo, como lo resaltan Lonsdale *et al.* (2020), la escala espacial no es contemplada en las ecuaciones de eficiencia 1, 2 y 3. Si la escala del sistema es la parcela, entonces los escurrimientos por drenaje superficial o subterráneo pueden considerarse como “pérdidas”; pero si la escala es la zona de riego o la cuenca, ya no pueden considerarse como pérdidas, pues pueden ser reutilizadas aguas abajo.

Diversos autores han propuesto mejoras en la definición de la eficiencia del riego recomendando el uso de relaciones o fracciones para considerar (y quitar) los flujos de retorno de la definición de eficiencia (Jensen, 2007; Perry, 2007).

RESULTADOS

La paradoja de Jevons y el efecto rebote (o la tragedia de las buenas intenciones)

Se ha documentado que la puesta en marcha de nuevas prácticas tecnológicas para el incremento de la eficiencia del riego ha aumentado el rendimiento y la productividad de la tierra y del agua. Sin embargo, con base en la evidencia empírica, se ha cuestionado si dichas prácticas promueven en efecto el ahorro real del agua de riego a expensas de otros usuarios, incluyendo la naturaleza misma (Perry, 1999; Tarjuelo *et al.*, 2015).

Como se representa en el gráfico 1, el agua aplicada a la parcela y que sale de la zona de raíces es reutilizable, y no son necesariamente “pérdidas” de agua. No obstante, la concepción de eficiencia promueve la introducción de sistemas de riego parcelario cerrados con flujos nulos de materia y energía más allá de las fronteras de los sistemas de irrigación (por ejemplo, el riego por goteo en la parcela o en áreas agrícolas bajo riego). Más aún, la alta eficiencia del riego parcelario reduce las pérdidas de agua que alimentan los procesos hidrológicos a múltiples escalas, ya que

el agua se hace circular por conductos a presión y se libera a través de emisores que dosifican de modo directo el agua en la zona de raíces. En paradoja, el incremento de la eficiencia de riego ha conducido a un aumento del consumo de agua en las zonas de riego como resultado de su tecnificación (Grafton *et al.*, 2018).

La paradoja de Jevons es más notoria en los casos de tecnificación parcelaria para zonas de riego abastecidas por aguas subterráneas. En tales zonas, los usuarios, en lugar de mantener la misma superficie y cultivos, usan el agua “ahorrada”, intensifican la agricultura, extienden las áreas de riego, que de manera individual y compuesta se traducen en una mayor extracción de agua (Sears, 2018; Grafton *et al.*, 2018).

Pfeiffer y Lin (2014) reportan un efecto rebote en respuesta a la adopción de tecnologías de riego más eficiente, como el riego de aspersión por pivote central, al cambiar la tecnología de alta por baja presión de operación, al oeste de Kansas, Estados Unidos. Dicha tecnificación llevó a un incremento de la “efectividad” del riego por unidad de agua aplicada, y ajustando la curva de maximización de la utilidad generó una mayor extracción de volúmenes del acuífero. Lo anterior ocurre en respuesta (i) a los cambios en los rendimientos esperados, (ii) a la reducción de los costos energéticos, (iii) a la conversión hacia cultivos más demandantes de agua, (iv) a la intensificación del uso de la tierra o (v) a un incremento en la superficie regable.

Económicamente, la paradoja de Jevons justifica la eficiencia de riego como deseable porque conlleva una maximización de las utilidades de los agricultores, lo que mejora no solo el uso eficiente del agua, sino también la calidad de vida del agricultor y las regiones agrícolas que las sustentan (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2011). El aumento de ingresos económicos y el incremento de la eficiencia de riego también han traído consigo la expansión de la superficie regable, la reconversión hacia cultivos más demandantes de agua y redituables y la intensificación del uso de la tierra (que supone la repetición de cultivos en la misma parcela por año agrícola o una mayor densidad de plantación en cultivos perennes) (Ward y Pulido-Velázquez, 2008).

Perry y Steduto (2017) concluyen que los beneficios de la tecnificación del riego parcelario pueden parecer muy importantes a escala parcela, pero cuando son cuantificados a escala cuenca, o incluso zona de riego, el consumo total de agua para riego incrementa en lugar de disminuir. Esto se ha documentado en Nuevo México, Estados Unidos, por Ward y Pulido-Velazquez (2008); en Montana, Estados Unidos, por Lonsdale *et al.* (2020), y en Tlaxcala, México, por Hernández-Rodríguez (2006).

Por otro lado, la modernización de zonas de riego demanda mayores habilidades tecnológicas de los usuarios y más personal operativo y directivo de la zona de riego, que implican un incremento de los costos de la tarifa de riego que debe ser absorbido

por los usuarios de riego. Uno de los aspectos que debe considerarse después de la tecnificación de zonas de riego es el aumento de los costos energéticos al convertir una zona de riego por gravedad a riego presurizado, como ha sido reportado por Wheeler *et al.* (2020) y Rodríguez-Díaz *et al.* (2011). Este aumento puede generar problemas en la operación de la zona de riego por la reticencia de los usuarios a pagar una mayor tarifa de riego y originar una mayor presión por subsidios gubernamentales para el mantenimiento y la operación de la infraestructura hidráulica modernizada. También se han documentado casos de adopción tecnológica sin subsidios y casos en que los regantes han desplazado a las empresas proveedoras del servicio de riego (Sanchis-Ibor *et al.*, 2017; Guzmán Gómez y Guzmán Ramírez, 2017).

La paradoja hidrológica o de escala

A escala cuenca, la paradoja de la eficiencia de riego se presenta cuando la “pérdida” del recurso hídrico ocurre aguas arriba e impide que los flujos de agua y energía lleguen a los ecosistemas aguas abajo, lo que provoca alteraciones en los procesos hidrológicos y deterioro de la salud de dichos sistemas, además de la radicalización de cambios en los patrones de distribución espacial y variabilidad temporal. Aun cuando la extracción de agua no aumente, o incluso disminuya, la intensificación y la expansión agrícola pueden tener efectos negativos en los flujos hidrológicos del ecosistema, en la recarga y descarga del acuífero, en los escurrimientos aguas abajo de la cuenca y en los patrones de evapotranspiración y precipitación resultantes de la disminución de los flujos de retorno (Muñoz-Arriola *et al.*, 2009; Muñoz-Arriola *et al.*, 2021; Jaimes-Correa *et al.*, 2022).

A la magnificación de los efectos negativos de los procesos hidrológicos a causa de la tecnificación de las zonas de riego se le denomina paradoja hidrológica (Gómez y Pérez, 2013; Gómez y Pérez, 2014). Scott *et al.* (2014) también la llaman paradoja de escala, ya que se presenta cuando se analiza un balance hidrológico a escala cuenca y así la distinguen de la paradoja de Jevons, que es una paradoja de tintes económicos a escala local o parcela (Lankford *et al.*, 2020).

Existen casos en que la disminución de extracciones redujo los flujos de retorno y afectó los flujos hidrológicos que recargan el acuífero y las corrientes superficiales. Rodríguez-Díaz *et al.* (2011) documentan una reducción de hasta el 40 por ciento del volumen extraído de las fuentes de abastecimiento con fines de riego, aunque el uso consuntivo del agua incrementó debido a la reconversión hacia cultivos con mayor demanda de agua y a la expansión de cultivos perennes.

Asumiendo la misma extracción de agua, Jägermehrer *et al.* (2015) estiman que la transición de sistemas de riego por gravedad a aspersión redujo los flujos de retorno por riego en 30 por ciento en promedio. Asimismo, el cambio de aspersión a goteo los redujo en 60 por ciento y calculan una reducción del 75 por ciento si se cambia de modo drástico de riego por gravedad a riego por goteo.

La reducción de los flujos de retorno ha sido objeto de controversia legal en Estados Unidos. La disminución de flujos aguas abajo de la cuenca del río Yellowstone ocasionada por la adopción masiva del riego por aspersión en la parte de la cuenca del estado de Wyoming condujo al estado de Montana a demandar en 2007 al estado de Wyoming ante la Suprema Corte de Estados Unidos (MacDonnell, 2012). La controversia fue rechazada por esta corte argumentando que el uso del agua ahorrada por tecnificación del riego estaba permitido, siempre y cuando se regara la misma superficie existente bajo riego en 1950.

Algunos estudios de caso también indican que transformar los riegos tradicionales sin un análisis sociohidrológico puede tener graves consecuencias en los flujos hidrológicos y, por ende, un impacto directo en el medio ambiente. Por ejemplo, en el caso del acuífero francés de Crau, del que se extrae una importante cantidad de agua para usos industrial, agrícola y doméstico, las aguas de retorno por sobreriegos son vitales para la recarga y la sustentabilidad del acuífero mismo (Pierre *et al.*, 2016). En Italia, en el valle del Po, en la cuenca del río Oglio, la recarga de los manantiales y las aguas subterráneas dependen de los riegos tradicionales, que también regulan la calidad del agua (Rotiroti *et al.*, 2019).

Como consecuencia de la paradoja hidrológica, Jensen (2007) resalta la importancia de considerar la fracción no consumida en la zona de riego en la planeación y el manejo de grandes sistemas de riego que capturan y reúsan los flujos de retorno. Las consecuencias negativas en la reducción de flujos hidrológicos por la tecnificación subsidiada de la infraestructura hidroagrícola de grandes zonas de riego han sido objeto de debate por parte de Grafton y Wheeler (2018), cuando analizaron la tecnificación de la cuenca Murray-Darling, en Australia. En virtud de que la agricultura es el principal usuario de agua, el gobierno australiano puso en marcha un ambicioso plan hídrico (Australian Government, 2007) para incrementar el gasto ecológico de los ríos a través de la inversión pública de grandes recursos. La acción central de dicho esfuerzo se basó en la reducción de la extracción de agua subterránea y superficial, así como en la compra de derechos de agua para la mejora de la eficiencia parcelaria y de conducción de la red de distribución (Wang *et al.*, 2018). Grafton (2019) y Williams y Grafton (2019) analizan cuantitativamente este plan hídrico y

reportan la concurrencia de las paradojas de Jevons e hidrológica, ya que las acciones emprendidas no solo fueron insuficientes para incrementar los flujos ambientales, sino que además las extracciones para riego aumentaron en 22 por ciento.

En el estado de Montana, Estados Unidos, Meredith y Blais (2019) muestran que la recarga de acuíferos por flujos de retorno de las zonas de riego se redujo por el revestimiento de canales y por la conversión de sistemas de riego por inundación a riego por aspersión reduciendo la capacidad de los pozos que abastecen a usuarios domésticos. También en Estados Unidos, las acequias tradicionales en Nuevo México o las políticas de conservación hídrica en Nebraska han permitido que las aguas de retorno mantengan los caudales del río durante más tiempo al reingresar las aguas de riego al río varios meses después y sostener la recarga de los acuíferos (Fernald *et al.*, 2015; Muñoz-Arriola *et al.*, 2021; Burbach *et al.*, 2022).

En Bangladesh, el riego tradicional de arroz permite la recarga del acuífero para poder ser usado en la temporada seca y se ha encontrado que técnicas para reducir el agua de riego afectan la recarga y el volumen de agua utilizable en la temporada seca (Tulip *et al.*, 2022). En México, en la zona de riego del río Colorado, la tecnificación y las demandas urbanas merman las aguas de retorno y afectan el caudal ambiental en el delta del río (Muñoz-Arriola *et al.*, 1999; Carrillo-Guerrero *et al.*, 2013).

DISCUSIÓN

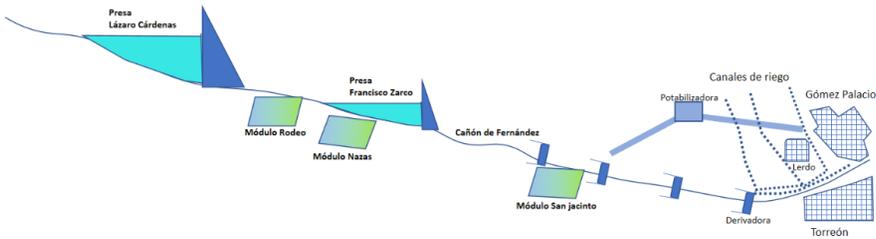
La tecnificación del riego del Distrito de Riego 017

Después de más de 200 años de practicar la agricultura de riego en la Comarca Lagunera y de la construcción de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, la alteración de los flujos de agua en los ríos Nazas y Aguanaval y la desaparición de los complejos lagunares son muestras de los impactos hidrológicos en la región.

El Distrito de Riego 017 (DR017) o Comarca Lagunera fue creado en 1937 y fue operado por el gobierno federal hasta 1998, cuando fue transferido a los usuarios de riego que se agruparon en las Asociaciones Civiles de Usuarios de Riego (ACUR). Hacia finales de los noventa, estas Asociaciones se hicieron cargo del servicio de riego y del mantenimiento de la infraestructura de los 20 módulos de riego en que se dividió el distrito. La superficie física de riego es de 223 632 hectáreas, aunque la superficie física máxima regable es de 88 660 hectáreas. El total de usuarios de riego es de 37 989 hectáreas, de los cuales 92.5 por ciento corresponde al régimen ejidal y 6.5 por ciento a la pequeña propiedad. En el gráfico 3 se ilustra

conceptualmente el DR017, incluyendo las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y los principales centros urbanos.

GRÁFICO 3. ESQUEMA GENERAL DEL DISTRITO DE RIEGO 017
EN EL MARCO DEL PROYECTO ASLL



Fuente: adaptado de Del Conde y Fuentes (2022).

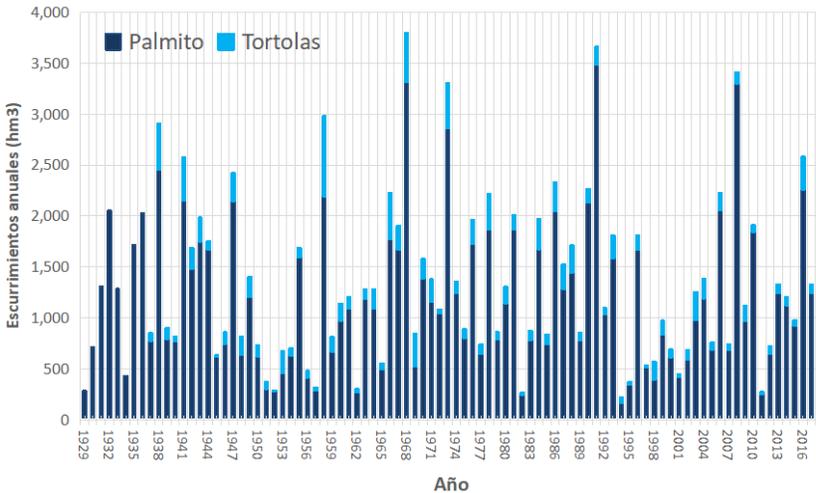
De acuerdo con la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2023b), las fuentes de abastecimiento superficiales del DR017 son los ríos Nazas y Aguanaval. En el primero, los cauces son controlados por las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, conocidas localmente como Palmito y Las Tórtolas, respectivamente. Ambas presas abastecen a 17 módulos de riego (del I al XVII) y concentran el 93.2 por ciento de la superficie regable. El río Aguanaval presenta una serie de derivaciones directas que abastecen a los tres módulos restantes (XVIII, XIX y XX) y que corresponden al 6.8 por ciento de la superficie regable y remanente del distrito. El volumen anual concesionado del DR017 es de 1 024.46 hectómetros cúbicos (hm^3), con 976.66 hm^3 de las dos presas para 17 módulos y 47.8 hm^3 de las derivaciones del río Aguanaval para los tres módulos que no cuentan con abastecimiento de presas de almacenamiento.

La infraestructura hidroagrícola de la zona de riego del Nazas consta de 40 presas derivadoras con una red de canales consistente en 655 kilómetros de canales principales, 1 778 kilómetros de canales secundarios y 12 167 estructuras de operación y control. La zona de riego del Aguanaval consta de 11 presas derivadoras y 513 kilómetros de canales principales que derivan directamente a las parcelas (CONAGUA, s/f).

La aportación media a las presas Lázaro Cárdenas, en el período 1929-2018, y Francisco Zarco, en el período 1937-2018, fue de 1 179 y 161 hm^3 , respectivamente. Las aportaciones del sistema de presas que abastecen al DR017 ocurren de julio a

octubre y muestran alta variabilidad interanual, como se ve en el gráfico 4, que ha significado una variación anual de la superficie regable de la zona del Nazas en el rango de 12 mil a 71 mil hectáreas en los últimos 25 años. El período de riegos de este Distrito, abastecido de aguas superficiales, es de marzo a julio.

GRÁFICO 4. VARIACIÓN ANUAL DE LAS APORTACIONES AL SISTEMA DE PRESAS QUE ABASTECEN AL DISTRITO DE RIEGO 017



Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA.

Otra fuente importante que abastece la superficie de riego en el área de influencia del DR017 es el acuífero Principal-Región Lagunera (P-RL), cuya superficie aproximada es de 12 617 kilómetros cuadrados y que se localiza en las cuencas bajas de los ríos Nazas y Aguanaval (CONAGUA, 2020). Casi la totalidad del territorio en el área de influencia del acuífero Principal-Región Lagunera se encuentra sujeta a las disposiciones de dos decretos de veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), el volumen total de extracción anual de dicho acuífero asciende a 1 088.5 hm³ anuales, de los cuales 883.9 hm³ (81.2 por ciento) se destinan al uso agrícola; 126.4 hm³ (11.6 por ciento), al abastecimiento de agua entubada a varios municipios de los estados de Coahuila y Durango, y el resto, a otros usos, 78.2 hm³ (7.2 por ciento). Los módulos de riego no tienen concesiones de agua subterránea del acuífero; sin embargo, se administra de manera individual por usuarios sin relación con los módulos de

riego del DR017, aunque existen muchas parcelas que tienen suministro de agua tanto superficial como subterránea.

En el más reciente balance del acuífero (CONAGUA, 2020) se estimó una extracción por bombeo (de agua concesionada y de extracción irregular) del orden de 1 088.5 hm³ anuales, con una recarga anual de 534.1 hm³, que incluye una recarga natural de 343.1 hm³ y una recarga inducida de 191 hm³; esta última dividida en dos componentes: 178.4 hm³ por retornos de riego y 12.6 hm³ por fugas en la red de agua potable y alcantarillado. Por lo tanto, anualmente hay una disminución en el almacenamiento del acuífero de 554.4 hm³, con abatimientos anuales promedio, espacialmente diferenciados, del orden de 0.5 a 4 m en el período 2010-2015. Del Conde (2022) indica que la recarga inducida total siempre es mayor de 50 por ciento (267 hm³) de la recarga total.

Cabe mencionar que el volumen anual concesionado del acuífero era de 683.15 hm³ a febrero de 2020, por lo que hay un déficit en la recarga de 149.05 hm³ anuales con respecto del volumen concesionado, con lo cual el déficit real del acuífero es de 554.4 hm³. Esto ubica al acuífero Principal-Región Lagunera como uno de los más vulnerables del país y que pone en riesgo la sustentabilidad del DR017 y de la región.

Según la CONAGUA (2020), un problema grave del balance de agua del acuífero es la falta de información de pozos existentes. En el censo de 2002 se registraron 2 350 pozos, de los cuales 1 925 se consideraron activos. Diversas fuentes periodísticas destacan la falta de información por parte de la CONAGUA acerca de la cantidad de pozos irregulares, ya que se menciona que el número real de pozos ascendía a más de 1 000, por lo que la CONAGUA solicitaba a la población indicar la localización de estos para proceder a su cancelación (Ávila, 2021). Sin duda, la cancelación de pozos irregulares es una acción prioritaria para controlar la sobreexplotación del acuífero.

El proyecto ASLL tiene por objetivo abastecer de agua potable hasta dos millones de habitantes para el año 2025. Las zonas urbanas están dentro del área de influencia del DR017 e incluyen cinco municipios del estado de Coahuila y cuatro del estado de Durango. El proyecto ASLL busca sustituir la actual fuente de abastecimiento subterránea por agua superficial proveniente del río Nazas a través de diversas obras hidráulicas, que comprenden acueductos presurizados, a fin de llevar el agua desde una presa derivadora sobre el cauce del río Nazas hacia una planta potabilizadora. Posteriormente, el agua pasará a tanques de almacenamiento y, finalmente, se entregará a los sistemas municipales de agua potable. Ello se debe a que en la actualidad la fuente de abastecimiento urbano es el acuífero Principal-Región Lagunera, que

tiene un fuerte abatimiento y cuya calidad de agua pone en riesgo a la población por las altas concentraciones de arsénico disuelto.

En la actualidad, las extracciones anuales promedio del sistema de presas para riego a nivel oscilan entre 800 y 1 050 hm³. Una vez terminado el proyecto ASLL, se espera extraer para riego entre 600 a 850 hm³ y destinar el volumen restante, 200 hm³, para agua potable (Espinosa, 2021).

Un punto central en el proyecto ASLL y que lo relaciona con las paradojas de Jevons e hidrológica es el planteamiento de realizar “ahorros” de agua mediante acciones de tecnificación en el DR017 subsidiadas por el gobierno federal. Esta propuesta consiste en la cesión “voluntaria” de agua por parte de los usuarios de riego con derechos de agua superficiales, que asciende a un volumen cercano a 200 millones de metros cúbicos. El proyecto contempla el incremento de las eficiencias de riego a través de la conversión de los actuales sistemas de riego parcelario a sistemas más eficientes para poder regar la misma superficie sin afectar sus rendimientos. Además, se pretende incrementar la eficiencia de la red de distribución con obras de revestimiento y entubamiento de canales de tierra. Esto resultaría en un “ahorro” de agua por tecnificación equivalente al volumen cedido para abastecimiento urbano del proyecto ASLL.

Aunque la propuesta del ASLL se sustenta en buenas intenciones, el DR017 está localizado en una zona árida con bajas precipitaciones y altas evaporaciones. Los valores climáticos anuales promedio del área superficial del acuífero Principal-Región Lagunera para la precipitación, temperatura y evaporación potencial son de 260 milímetros, 19.0 °C y 2 500 milímetros, respectivamente (CONAGUA, 2020). La recarga vertical por lluvias anual asumida es 110.6 hm³, que podría impactarse por reducción de la precipitación a causa de la intensificación del cambio climático.

La evaporación de las presas y de los cauces es alta. Espinosa (2021) reporta una evaporación anual promedio de 150 hm³, que podría aumentar en el embalse de la presa Lázaro Cárdenas y que, sumado al volumen requerido para abastecimiento de agua potable, el agua percolada de los embalses y cauces y la evaporada de los cauces, complicará mantener anualmente el abastecimiento de agua al sistema de agua potable. En tan solo 10 por ciento de los años registrados, las aportaciones de las presas podrían no cumplir con la demanda urbana requerida y no habría agua para uso agrícola. Considerando esto y que el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 126.4 hm³ (CONAGUA, 2020), el probable déficit hídrico orillaría a los sistemas municipales de agua potable a no cancelar la extracción de agua de pozos profundos.

En el año 2022 se invirtieron 190 millones de pesos para revestir 29.8 kilómetros y entubar 1.8 kilómetros de canales y 17.7 kilómetros de canales ramales con tomas granja en válvulas alfalferas. Se tecnificaron 265 hectáreas con sistemas de riego por goteo. La cantidad total de dinero programada en infraestructura hidroagrícola es 2 755 millones de pesos, que representa el 20 por ciento del total programado del proyecto ASLL para obras de mejora de la eficiencia y para la gestión de derechos de agua por tecnificación del riego. Sin embargo, no se tiene información de la totalidad de obras de tecnificación de riego parcelarias ni de los canales de riego aún por tecnificar. Esta carencia de información complica la realización de un análisis detallado para estimar los flujos hidrológicos. En el cuadro 1 solo se anota el

**CUADRO 1. POSIBLES CAMBIOS EN LOS FLUJOS POR EFECTOS
DE LAS OBRAS PROGRAMADAS EN EL DISTRITO DE RIEGO 017
PARA MEJORA DE LA APLICACIÓN DEL RIEGO PARCELARIO Y DE LA EFICIENCIA
DE CONDUCCIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

Flujos	Sentido	Razones
Recarga inducida por retornos de riego parcelario	Disminuirán con efecto negativo sobre el acuífero.	Al incrementar la eficiencia de riego con sistemas de riego parcelario más eficientes.
Percolación de canales	Disminuirán con efecto negativo sobre el acuífero.	Al incrementar la eficiencia de conducción por entubamiento y revestimiento de canales.
Percolación de tramo muerto	Se mantendrán en la mayor parte, pero se incrementará el caudal base en un tramo de 28 km del río. Efecto positivo sobre el acuífero.	Se mantendrá inalterado en el tramo muerto entre ambas presas, pero incrementará en el Cañón de Fernández (en el tramo del cauce de la presa Francisco Zarco hasta la derivadora que conectará un acueducto a la planta potabilizadora) que permanecerá con flujo todo el año.
Evaporación de embalses, corrientes superficiales y canales	Disminuirán en la zona de riego. Efecto neutro sobre el acuífero, efecto positivo en el ahorro agua.	Se mantendrá en embalses y ríos, pero reducirá en canales entubados.
Recarga vertical por lluvia	Disminuirán con efecto negativo sobre el acuífero.	Por efectos del cambio climático, aunque hay incertidumbre de la magnitud de dicho decremento en la recarga.
Flujos evaporativos de embalses, cauces y canales abiertos, y evapotranspirativos de especies vegetales	Mayor incremento por aumento de la temperatura.	Cambio en los patrones climáticos por intensificación del cambio climático.

Fuente: elaboración propia.

sentido de los cambios en los flujos esperados por el proyecto ASLL de acuerdo con el impacto de las obras de tecnificación, a escala parcela y red de distribución, de una zona de riego, como se indica en los flujos de agua mostrados en los gráficos 1 y 2.

RECOMENDACIONES

Sin duda, se requiere de una visión integral sustentada en las experiencias y repercusiones documentadas en otros países donde proyectos de tecnificación similares al ASLL no solo han afectado las fuentes y demandas de agua, sino también han alterado los procesos hidrológicos, biogeoquímicos y socioeconómicos a través de las escalas de espacio y tiempo. Está claro que la modernización o tecnificación del riego ahorra agua a escala parcelaria; no se ahorra agua a escala cuenca y, por el contrario, altera los procesos sociohidrológicos de la región.

La tecnificación exitosa del riego debe resolver o minimizar las paradojas asociadas a las eficiencias de riego. A tal fin, se puede considerar la política de la Unión Europea que consiste en limitar o restringir el volumen de agua que se toma de la fuente y dejar la cantidad “ahorrada” en la misma fuente. Esta estrategia implica también el incremento de la capacidad de medición del ciclo hidrológico a escala cuenca. El impacto es especialmente importante cuando los regadíos son ancestrales, asimismo “dejar” el agua en el río puede tener efectos de apropiación no esperados.

Es necesario dimensionar las “pérdidas” en la conducción antes de realizar la tecnificación de una zona de riego; por ejemplo, en el caso del valle del Po, en Italia, y en el caso de Francia, los riegos tradicionales cumplen un papel indispensable en la recarga del acuífero (Pierre *et al.*, 2016; Rotiroti *et al.*, 2019).

En otros casos, los riegos tradicionales permiten un reingreso del agua al río; a su vez, por el desfase temporal, la descarga de los acuíferos hace posible contar con un caudal base en el río durante más meses, como se documenta en Nuevo México. En otros casos, el reingreso del agua al río posibilita disminuir la temperatura del agua. De nuevo, dejar el agua en el río no es la opción más conveniente en estos casos (Lonsdale *et al.*, 2020; Ochoa *et al.*, 2007, 2020).

También se sugiere que proyectos como el ASLL deben analizar y cuantificar la magnitud y el cambio de los flujos regionales superficiales y subterráneos, así como estimar los cambios radicales en la estructura y la función de los sistemas sociohidrológicos del DR017 producto de la tecnificación de los recursos hídricos y agrícolas. El estudio de la hidrología de cuencas y la operacionalización de la

irrigación deberán explicar los procesos y las acciones que ocurren en el continuo geoespacial desde la parcela, pasando por la red de distribución, y alcanzando la escala cuenca y regional.

Tomando en cuenta lo referido por McMillan *et al.* (2022) y Tarasova *et al.* (2024), se sugiere monitorear aquellos procesos hidrológicos dominantes y sus escalas para crear mejores prácticas de manejo de recursos que conserven la funcionalidad y la respuesta de los flujos superficiales y subsuperficiales en la cuenca o unidad geohidrológica.

Asimismo, es crítico que se evalúe la interdependencia de las paradojas de la eficiencia del riego desde un punto de vista hidrosocial y productivo, y se integren los efectos del cambio y la variabilidad climática al manejo del agua en la agricultura. Ambas paradojas, y su integración, son una respuesta sociohidrológica al manejo de la irrigación que puede crear múltiples rutas o trampas para alcanzar la sustentabilidad hídrica y agrícola en cualquier región del mundo (Uden *et al.*, 2018; Di Baldassarre, *et al.*, 2019). Además, los efectos de la variabilidad y el cambio climáticos representan un gran reto para la resiliencia y la seguridad hídrica y agrícola debido a la limitada habilidad predictiva y complejidad de múltiples factores ambientales involucrados, como son los eventos hidrometeorológicos y climáticos extremos (Pérez-Morga *et al.*, 2013; Sarzaeim *et al.*, 2021; Carrillo *et al.*, 2023) o las respuestas hidrológicas al desarrollo y manejo de infraestructura hidráulica bajo condiciones climáticas cambiantes (Ou *et al.*, 2018; Ghosh y Muñoz-Arriola, 2023).

Lo propuesto en la Comarca Lagunera supone un patrón climático estacionario donde las lluvias aportan los volúmenes escurridos a las presas de acuerdo con los registros históricos, que ya no pueden ser válidos para el diseño y el manejo de recursos hídricos (Milly *et al.*, 2008). Por lo tanto, es indispensable incorporar a las prácticas de diseño, manejo y seguridad hídrica y agrícola la modelación de procesos hidrológicos bajo nuevos escenarios climáticos apoyados en nuevas tecnologías geoespaciales y satelitales (Wilson *et al.*, 2021; Muñoz-Arriola *et al.*, 2021; Stuart *et al.*, 2024; Volk *et al.*, 2024).

CONCLUSIONES

La tecnificación del riego parcelario ha traído, sin duda, grandes beneficios para las zonas agrícolas; sin embargo, cuando se ponderan los beneficios a escala zona de riego, cuenca o acuífero, se cuestiona su efectividad para el ahorro de agua,

pues existe una contradicción entre las metas del agricultor de producir más aumentando la productividad del agua y de la tierra y las metas socioambientales de reasignar el agua a otros sectores, incluido el ambiental. Así, un incremento de la productividad y del valor del agua entregada a los usuarios como consecuencia de la tecnificación del riego es un incentivo para que el agricultor use mayores volúmenes de agua. Dicho efecto agrava las condiciones en las zonas de riego con mayor presión hídrica en donde el agua es el insumo más productivo. Este caso se encuentra documentado con amplitud en varias partes del mundo y es conocido como la paradoja de Jevons.

La definición clásica de eficiencia del riego ha causado graves problemas ambientales; por lo tanto, la tradicional visión ingenieril debe transformarse en una visión más hidrológica e integral en la que el conocimiento, la cuantificación, el destino y la importancia de los flujos que se presentan en una zona de riego, en particular de los flujos de retorno que alimentan las aguas superficiales y subterráneas, tengan un papel clave en la evaluación de los efectos ambientales causados por la tecnificación de las grandes zonas de riego.

La tecnificación de zonas de riego a través del desarrollo de diversas obras de infraestructura de riego modifica, sin duda, los flujos de agua naturales y el uso del suelo. No obstante, bajo una grave presión hídrica de diversas zonas de riego, se debe tener una visión más global del problema y considerar el factor escala cuando se tecnifican las zonas de riego, ya que ahora se debe considerar no solo la dimensión agronómica de producir más, sino también la dimensión hidrológica para mantener el consumo de agua en niveles sustentables sin afectar otros sectores, incluido el ambiental. Además, la dimensión social también debe considerarse para cumplir con el derecho humano al agua en cantidad y calidad.

La concurrencia de dos paradojas, la de Jevons y la hidrológica, a diferentes escalas espaciales (parcela, zona de riego y cuenca) conforma la llamada paradoja de riego y representa un reto para la seguridad y la sustentabilidad hídrica, alimentaria, energética y ecológica de una zona de riego. Además, puede magnificarse cuando los flujos a escala cuenca hidrológica son alterados a causa de la tecnificación en las zonas de riego.

El análisis de la tecnificación del Distrito de Riego 017, en el norte de México, indica que una mejora en la eficiencia del riego a través de tecnologías de riego más avanzadas, como el riego por goteo, reducirán las “pérdidas” de agua por la reducción de los escurrimientos subterráneos y superficiales, y puede crear la falsa percepción de mayor agua disponible para los cultivos e inducir al productor a una

ampliación de superficie cultivada o a un cambio hacia cultivos más demandantes de agua. Aunado a que el revestimiento o entubamiento de canales de la red de distribución de agua, sin duda, reducirán los flujos hidrológicos que recargan los acuíferos y las corrientes superficiales, en una zona árida ya con grave presión hídrica.

Se recomienda que antes de realizar la tecnificación de una zona de riego es conveniente saber a dónde se va el agua “perdida” que se rescatará con tal intervención. En adición, los servidores públicos, siempre entusiasmados por las posibilidades de liberar agua, deben considerar que es necesario reducir o controlar la dotación o concesión de agua al tomar en cuenta el posible efecto rebote, es decir, la tentación del agricultor de aumentar la extracción de agua. Se sugiere así porque los agricultores, como producto de la tecnificación parcelaria, tienen las posibilidades de ahorro de mano de obra, aumento de la densidad de siembra e intensificación de cultivos, incremento de rendimientos por un mejor acoplamiento del riego con las necesidades hídricas de los cultivos, entre otros. Esto tiene un efecto documentado de incremento de la extracción de agua cuando no se controla el volumen de agua concesionado y la superficie.

Se concluye que para la resolución o minimización de las paradojas asociadas a las eficiencias de riego, aplicación y conducción se requiere de un nuevo marco conceptual para una aplicación sustentada en un análisis riguroso de los efectos desde la escala parcela hasta cuenca, que incluye los flujos superficiales y subterráneos, al intervenir zonas de riego. Todo ello debe ser tomado en cuenta por técnicos y administradores públicos responsables de la planeación, ejecución y evaluación de obras públicas de infraestructura hidroagrícola considerando evidencias científicas recientes de desviaciones imprevistas al no generar los ahorros de agua esperados con obras subsidiadas por el Estado.

El Distrito de Riego 017 requiere el enriquecimiento de los acervos digitales de variables hídricas, climáticas, socioeconómicas y la creación de sistemas de modelación y transformación de datos que permitan tomar decisiones informadas y generar reglas de operación de la infraestructura no solo para el siguiente ciclo agrícola, sino también para los múltiples escenarios futuros que pudiesen presentarse en los años y décadas venideros.

BIBLIOGRAFÍA

- Australian Government. (2007). Water Act 2007 (No. 137). <https://www.legislation.gov.au/C2007A00137/2021-09-01/text>
- ÁVILA, Mayela. (2021, septiembre 1). 'No los tengo notificados', más de mil pozos de agua presuntamente irregulares; señala director general de Conagua. *Noticieros Grem.* <https://www.noticierosgrem.com.mx/no-los-tengo-notificados-mas-de-mil-pozos-de-agua-presuntamente-irregulares-senala-director-general-de-conagua/>
- BANDA, Mavuto M.; Heeren, Derek M.; Derrel, Martin; Muñoz-Arriola, Francisco, y Hayde, László G. (2019, julio 7-10). *Economic analysis of deficit irrigation in sugarcane farming: Nchalo Estate, Chikwawa District, Malawi* [Conferencia presentada]. ASABE Annual International Meeting, Boston, Massachusetts (Paper No. 1900852). <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/607>
- BURBACH, Mark E.; Eaton, Weston M.; Quimby, Barbara; Babbitt, Christina, y Delozier, Jodi L. (2022). Longitudinal assessment of an integrated approach to large-scale common-pool water resource management: a case study of Nebraska's Platte River basin. *Ecology and Society*, 27(4), 30. <https://doi.org/10.5751/ES-13579-270430>
- CARRILLO, Carlos M.; Muñoz-Arriola, Francisco, y Chen, Liang. (2023). Multi-scale Sources of Precipitation Predictability in the Northern Great Plains. *Preprints* 2023120362. <https://doi.org/10.20944/preprints202312.0362.v1>
- CARRILLO-GUERRERO, Yamilet; Glenn, Edward P., e Hinojosa-Huerta, Osvel. (2013). Water budget for agricultural and aquatic ecosystems in the delta of the Colorado River, Mexico: Implications for obtaining water for the environment. *Ecological Engineering* (59), 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.047>
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). (2023a, diciembre 30). Reglas de Operación para el Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola, a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2023. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/788655/REGLAS_DE_OPERACION_HIDROAGRICOLA_30_DIC_2022.pdf
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2023b). Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Principal-Región Lagunera (0523), Estado de Coahuila*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/coahuila/DR_0523.pdf

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). *Agenda del Agua 2030*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (s/f). Plan Director del Distrito de Riego 017. Comisión Nacional del Agua.
- DEL CONDE, Juan Pablo, y Fuentes, Eduardo Aarón. (2022, noviembre 14). *Proyecto Agua Saludable para La Laguna: un paso para recuperar la seguridad hídrica en la región lagunera. Diálogo con ingenieros* [video]. CICM Oficial. Colegio de Ingenieros Civiles de México. YouTube. <https://www.youtube.com/live/S4HVX-Td9UQ>
- DI BALDASSARRE, Giuliano; Sivapalan, Murugesu; Rusca, Maria; Cudennec, Christophe; García, Margaret; Kreibich, Heidi; Konar, Megan; Mondino, Elena; Mard, Johanna; Pande, Saket; Sanderson, Matthew; Tian, Fuqiang; Viglione, Alberto; Wei, Jing; Wei, Yongping; J. Yu, David; Srinivasan, Veena, y Blöschl, Günter. (2019). Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. *Water Resources Research* (55), 6327-6355. <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>
- EC (European Commission). (2015a). The Water Framework Directive and the Floods Directive: Actions towards the 'good status' of EU water and to reduce flood risks. Commission Staff Working Document. Report on the implementation of the Water Framework Directive River Basin Management Plans. Member State: SPAIN [SWD (2015) 56 final]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0056&qid=1694710954575>
- EC (European Commission). (2015b). *Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD. Final – Version 6.1. – 18/05/2015*. European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/352735>
- EC (European Commission). (2012). A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources. Communication from The Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions [COM (2012) 673 final]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673&from=EN>
- ESPINOSA, Carlos. (2021). *Proyecto Ejecutivo: Agua Saludable para La Laguna. Abastecimiento de Agua Potable a la Región Lagunera*. Comisión Nacional del Agua, Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología, Consorcio de Redes de Innovación Cooperativa y Red de Agua y Recursos Ambientales. <https://docplayer.es/215262642-Proyecto-ejecutivo-agua-saludable-para-la-laguna-abastecimiento-de-agua-potable-a-la-region-lagunera.html>

- FERNALD, Alexander; Guldan, Steven; Boykin, Kris; Cibils, Andrés; Gonzáles, Melinda; Hurd, Brian; López, Sandra; Ochoa, Clara; Ortiz, María; Rivera, Josue; Rodríguez, Stephanie, y Steele, Christen. (2015). Linked hydrologic and social systems that support resilience of traditional irrigation communities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 293-307. <https://doi.org/10.5194/hess-19-293-2015>
- FLORES, Lourdes. (2023, septiembre 3). Estados tienen hasta 50% de fugas en agricultura de riego: Consejo Consultivo del Agua. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/estados/Estados-tienen-hasta-50-de-fugas-en-agricultura-de-riego-Consejo-Consultivo-del-Agua-20230903-0019.html>
- GHOSH, Kausik, y Muñoz-Arriola, Francisco. (2023). Hysteresis and streamflow-sediment relations across the pre-to-post dam construction continuum in a highly regulated transboundary Himalayan River basin. *Journal of Hydrology* (624), 129885. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129885>
- Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2022, julio 19). Plan Hídrico Estatal 2021-2050. Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, Tomo XXIII, Número 38. [eservicios2.aguascalientes.gob.mx/PeriodicoOficial/Archivos/9232.pdf](https://servicios2.aguascalientes.gob.mx/PeriodicoOficial/Archivos/9232.pdf)
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2022). *Plan Estatal Hídrico 2040*. Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua. <https://www.jcas.gob.mx/peh2040/>
- Gobierno del Estado de México. (2018). *Programa Hídrico Integral del Estado de México 2017-2023*. Gobierno del Estado de México, Secretaría del Agua del Estado de México, Comisión del Agua del Estado de México. <https://agua.edomex.gob.mx/sites/agua.edomex.gob.mx/files/files/AcercaCAEM/PHIEM1.pdf>
- Gobierno del Estado de Morelos. (s/f). *Programa Hídrico del Estado de Morelos 2019-2024*. Comisión Estatal del Agua, Coordinación Técnica. https://www.hacienda.morelos.gob.mx/images/docu_planeacion/planea_estrategica/programas_sectoriales/2019-2024/Programa_estatal_hidrico.pdf
- GÓMEZ, Carlos, y Pérez, Dionisio. (2014). Simple Myths and Basic Maths About Greening Irrigation. *Water Resources Management* (28), 4035-4044. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0725-9>
- GÓMEZ, Carlos, y Pérez, Dionisio. (2013, abril 8-10). *Myths and Maths of Water Efficiency: An Analytical Framework to Assess the Real Outcome of Water Saving Technologies in Irrigation 2013* [Conferencia presentada]. 87th Annual Conference of the Agricultural Economics Society, University of Warwick, Coventry, United Kingdom.
- GONZÁLEZ VILLARREAL, Fernando; Vázquez, Eduardo; Aguilar, Enrique, y Arriaga, Jorge Alberto. (2022). *Perspectivas del agua en México: propuestas hacia la seguridad*

- hídrica*. Centro Regional de Seguridad Hídrica-UNESCO, Red del Agua-UNAM. http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/Perspectivas_AguasMexico2022.pdf
- GRAFTON, R. Quentin. (2019). Policy review of water reform in the Murray-Darling Basin, Australia: the “do’s” and “do’nots”. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* (63), 116-141. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12288>
- GRAFTON, R. Quentin, y Wheeler, Sarah Ann. (2018). Economics of water recovery in the Murray-Darling Basin, Australia. *Annual Review of Resource Economics* (10), 487-510. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023039>
- GRAFTON, R. Quentin; Williams, John; Perry, C. J.; Molle, François; Ringler, Claudia; Steduto, Pasquale; Udall, Bradley; Wheeler, Sarah Ann; Wang, Yi; Garrick, Dustin, y Allen, Richard G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748-750. <https://doi.org/10.1126/science.aat9314>
- GUZMÁN GÓMEZ, Elsa, y Guzmán Ramírez, Nohora Beatriz. (2017). *Conocimientos y adaptaciones tecnológicas en Los Altos de Morelos*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, María de Lourdes. (2006). El uso del agua subterránea en la agricultura del estado de Tlaxcala. En Ignacio Ocampo, J. Francisco Escobedo y Benito Ramírez-Valverde (eds.), *El agua: recurso en crisis* (pp. 137-146). Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Fundación Produce Puebla.
- HOFFMANN, Patrick, y Villamayor-Tomas, Sergio. (2023). Irrigation modernization and the efficiency paradox: a meta-study through the lens of Networks of Action Situations. *Sustainability Science* (18), 181-199. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01136-9>
- HUFFAKER, Ray G., y Whittlesey, Norman K. (1995). Agricultural Water Conservation Legislation: Will it save water? *Magazine of Food, Farm, and Resource Issues, Agricultural and Applied Economics Association*, 10(4), 1-5. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.131316>
- JÄGERMEHR, Jonas; Gerten, Dieter; Heinke, Jens; Schaphoff, Sibyll; Kummu, Matti, y Lucht, Wolfgang. (2015). Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences* (19), 3073-3091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>
- JAIMES-CORREA, Juan Carlos; Muñoz-Arriola, Francisco, y Bartelt-Hunt, Shannon. (2022). Modeling water quantity and quality nonlinearities for watershed adaptability to hydroclimate extremes in agricultural landscapes. *Hydrology*, 9(5), 80. <https://doi.org/10.3390/hydrology9050080>

- JENSEN, Marvin E. (2007). Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science* (25), 233-245. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0060-5>
- LANKFORD, Bruce; Closas, Alvar; Dalton, James; López, Elena; Hess, Tim; Knox, Jerry W.; Van der Kooij, Saskia; Lautze, Jonathan; Molden, David; Orr, Stuart; Pittock, Jamie; Richter, Brian; Riddell, Philip; Scott, Christopher; Venot, Jean-Philippe; Vos, Jeron, y Zwartveen, Margreet. (2020). A scale-based framework to understand the promises, pitfalls and paradoxes of irrigation efficiency to meet major water challenges. *Global Environmental Change* (65), 102182. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102182>
- LONSDALE, Whitney R.; Cross, Wyatt F.; Dalby, Charles E.; Meloy, Sara E., y Schwend, Ann C. (2020). *Evaluating Irrigation Efficiency: Toward a sustainable water future for Montana*. Montana University System Water Center, Montana State University. <https://doi.org/10.15788/mwc202011>
- MACDONNELL, Lawrence. (2012). Montana v. Wyoming: Sprinklers, Irrigation Water Use Efficiency and the Doctrine of Recapture. *Golden Gate University Environmental Law Journal*, 5(2), 2691099. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2691099>
- MCMILLAN, Hilary K.; Gnann, Sebastian J., y Araki, Ryoko. (2022). Large scale evaluation of relationships between hydrologic signatures and processes. *Water Resources Research* (58), e2021WR031751. <https://doi.org/10.1029/2021WR031751>
- MEREDITH, Elizabeth, y Blais, Nicole. (2019). Quantifying irrigation recharge sources using groundwater modeling. *Agricultural Water Management* (214), 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.032>
- MILLY, P. C. D.; Betancourt, Julio; Falkenmark, Malin; Hirsch, Robert; Kundzewicz, Zbigniew; Lettenmaier, Dennis, y Stouffer, Ronald. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574. https://www.law.berkeley.edu/files/CLEE/Milly_2008_Science_StationarityIsDead.pdf
- MUÑOZ-ARRIOLA, Francisco; Abdel-Monem, Tarik, y Amaranto, Alessandro. (2021). Common pool resource management: Assessing water resources planning for hydrologically connected surface water and groundwater systems. *Hydrology*, 8(1), 8010051. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010051>
- MUÑOZ-ARRIOLA, Francisco; Avissar, Ronni; Zhu, Chunmei, y Lettenmaier, Dennis P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resources Research*, 45(11), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007WR006783>
- MUÑOZ-ARRIOLA, Francisco; Carriquiry-Beltran, José Domingo; Nieto-García, Edwina, y Hernández-Ayon, Martín. (1999). Colorado River Delta. En S. V. Smith, J. I.

Marshall y C. J. Crossland (comps.), *Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes* (pp. 59-69). Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Core Project of the IGBP (LOICZ Reports and Studies, 13).

- OCHOA, Carlos G.; Fernald, Alexander G.; Guldán, Steven J., y Shukla, Manoj K. (2007). Deep percolation and its effects on shallow groundwater level rise following flood irrigation. *Transactions of the ASABE*, 50(1), 73-81. https://wcrp.nmsu.edu/northern-nm-water-research/documents/deep-percolation-and-its-effects-on-shallow-groundwater-rise-following-flood-irrigation_choa-et-al-2007.pdf
- OCHOA, Carlos G.; Guldán, Steve J., y Fernald, Sam. (2020). Surface Water and Groundwater Interactions in Acequia Systems of Northern New Mexico. En Adrienne Rosenberg y Steven Guldán (eds.), *Acequias of the Southwestern United States: Elements of resilience in a coupled natural and human system* (pp. 33-40). New Mexico State University, Agricultural Experiment Station. Research Report 796.
- OJEDA, Waldo, e Íñiguez, Mauro. (2015). Capítulo 3. El agua en el suelo. En Waldo Ojeda y Jorge Flores (eds.), *Calendarización del riego: teoría y práctica* (pp. 61-71). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2177>
- OU, Gengxin; Muñoz-Arriola, Francisco; Uden, Daniel R.; Martin, Derrel; Allen, Craig R., y Shank, Nancy. (2018). Climate change implications for irrigation and groundwater in the Republican River Basin, USA. *Climatic Change* (151), 303-316. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2278-z>
- PÉREZ-BLANCO, Carlos Dionisio; Loch, Adam; Ward, Frank; Perry, Chris, y Adamson, David. (2021). Agricultural water saving through technologies: a zombie idea. *Environmental Research Letters* (16), 114032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2fe0>
- PÉREZ-BLANCO, Carlos Dionisio; Hrast-Essenfelder, Arthur, y Perry, Chris. (2020). Irrigation technology and water conservation: a review of the theory and evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 14(2), 216-239. <http://dx.doi.org/10.1093/reep/reaa004>
- PÉREZ-MORGA, Nancy; Kretzshmar, Thomas; Cavazos, Tereza; Smith, Stephen V., y Muñoz-Arriola, Francisco. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal River Basins of the Southern Mexican Pacific Region. *Geofísica Internacional*, 52(3), 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71477-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71477-6)
- PERRY, Chris. (2007). Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrigation and Drainage* (56), 367-378. <https://doi.org/10.1002/ird.323>

- PERRY, Chris. (1999). The IWMI water resources paradigm – Definitions and implications. *Agricultural Water Management*, 40(1), 45-50. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00102-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00102-4)
- PERRY, Chris; Steduto, Pasquale, y Karajeh, Fawzi. (2017). *Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/3/i7090en/I7090EN.pdf
- PFEIFFER, Lisa, y Lin, C. Y. Cynthia. (2014). Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2), 189-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeem.2013.12.002>
- PIERRE, Séraphin; Vallet-Coulomb, Christine, y Gonçalves, Julio. (2016). Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flows using stable isotopes: The Crau Aquifer. *Journal of Hydrology* (542), 241-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.005>
- PISANTY, Julieta. (2003). *Evaluación ambiental sectorial del Proyecto de Modernización Integral de Riego (PMIR)*. Banco Mundial, Comisión Nacional del Agua.
- RODRÍGUEZ-DÍAZ, Juan Antonio; Pérez-Urrestarazu, Luis; Camacho-Poyato, Emilio, y Montesinos, Pilar. (2011). The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1 000-1008. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10>
- ROMANELLI, Thiago L.; Muñoz-Arriola, Francisco, y Colaço, Andre F. (2022). Conceptual framework to integrate economic drivers of decision making for technology adoption in agriculture. *Engineering Proceedings*, 9(1), 43. <https://doi.org/10.3390/engproc2021009043>
- ROTIROTI, Marco; Bonomi, Tullia; Sacchi, Elisa; McArthur, John M.; Stefania, Genaro A.; Zanotti, Chiara; Taviani, Sara; Patelli, Martina; Nava, Veronica; Soler, Valentina; Fumagalli, Letizia, y Leoni, Barbara. (2019). The effects of irrigation on groundwater quality and quantity in a human-modified hydro-system: The Oglio River basin, Po Plain, Northern Italy. *Science of the Total Environment* (672), 342-356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.427>
- SANCHIS-IBOR, Carles; Boelens, Rutgerd, y García-Mollá, Marta. (2017). Collective irrigation reloaded. Recollection and re-moralization of water management after privatization in Spain. *Geoforum* (87), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.10.002>
- SARZAEIM, Parisa; Ou, Wengi; Alves, Luciano, y Muñoz-Arriola, Francisco. (2021). Flood-Risk Analytics for Climate-Resilient Agriculture Using Remote Sensing

- in the Northern High Plains. En Christopher L. Meehan, Miguel A. Pando, Ben A. Leshchinsky y Navid H. Jafari (eds.), *Geo-Extreme 2021* (pp. 234-244). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784483695.023>
- SCOTT, Christopher A.; Vicuña, Sebastian; Blanco-Gutiérrez, Irene; Meza, Francisco, y Varela-Ortega, Consuelo. (2014). Irrigation efficiency and water-policy implications for river-basin resilience. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4), 1339-1348. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1339-2014>
- SEARS, Louis; Caparelli, Joseph; Lee, Clouse; Pan, Devon; Strandberg, Gillian; Vuu, Linh, y Lin Lawell, C. Y. Cynthia. (2018). Jevons' Paradox and Efficient Irrigation Technology. *Sustainability*, 10(5), 1590. <https://doi.org/10.3390/su10051590>
- SECKLER, David. (1996). *The New Era of water resources management: From "dry" to "wet" water savings*. International Irrigation Management Institute (Research Report, 1). https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub001/REPORT01.PDF
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2022, diciembre 30). Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642632/PNH_2020-2024__primo.pdf
- SHEKHAR, Shashi; Colletti, Joe; Muñoz-Arriola, Francisco; Ramaswamy, Lakshmish; Krintz, Chandra; Varshney, Lav, y Richardson, Debra. (2017). Intelligent infrastructure for smart agriculture: An integrated food, energy and water system. *CoRR* abs/1705.01993. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.01993>
- STUART, Laurent; Hobbins, Mike; Niebuhr, Emily; Ruane, Alex C.; Pulwarty, Roger; Hoell, Andrew; Thiaw, Wassila; Rosenzweig, Cynthia; Muñoz-Arriola, Francisco; Jahn, Molly, y Farrar, Michael. (2024). Enhancing Global Food Security: Opportunities for the American Meteorological Society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(4), 760-777. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0106.1>
- TARASOVA, Larisa; Gnann, Sebastian; Yang, Soohyun; Hartmann, Andreas, y Wagener, Thorsten. (2024). Catchment characterization: Current descriptors, knowledge gaps and future opportunities. *Earth-Science Reviews* (252), 104739. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104739>
- TARJUELO, José M.; Rodríguez-Díaz, Juan A.; Abadía, Ricardo; Camacho, Emilio; Rocamora, Carmen, y Moreno, Miguel A. (2015). Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management* (162), 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009>

- TULIP, Shibli Sadik; Siddik, Sifat; Islam, Nazrul; Rahman, Atikur; Torabi Haghghi, Ali, y Mustafa, Syed. (2022). The impact of irrigation return flow on seasonal groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Agricultural Water Management* (266), 107593. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107593>
- UDEN, Daniel R.; Allen, Craig R.; Muñoz-Arriola, Francisco; Ou, Gengxin, y Shank, Nancy. (2018). A framework for tracing social-ecological trajectories and traps in intensive agricultural landscapes. *Sustainability*, 10(5), 1646. <https://doi.org/10.3390/su10051646>
- VAN HALSEMA, Gerardo E., y Vincent, Linden. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management* (108), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.016>
- VOLK, John M.; Huntington, Justin L.; Melton, Forrest S.; Allen, Richard; Anderson, Martha; Fisher, Joshua; Kilic, Ayse; Ruhoff, Anderson; Senay, Gabriel; Minor, Blake; Morton, Charles; Ott, Thomas; Johnson, Lee; Comini, Bruno; Carrara, Will; Doherty, Conor; Dunkerly, Christian; Fridrichs, MacKenzie; Guzmán, Alberto; Hain, Christopher; Halverson, Gregory; Kang, Yanghui; Knipper, Kyle; Laipelt, Leonardo; Yang, Yun; Ortega-Salazar, Samuel; Pearson, Christopher; Parrish, Gabriel; Purdy, Adam; ReVelle, Peter, y Wang, Tianxin. (2024). Assessing the accuracy of OpenET satellite-based evapotranspiration data to support water resource and land management applications. *Nature Water* (2), 193-205. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00181-7>
- VON SCHNEIDEMESSER, Erika; Melamed, Megan, y Schmale, Julia. (2020). Prepare Scientists to Engage in Science-Policy. *Earth's Future*, 8(11), e2020EF001628. <https://doi.org/10.1029/2020EF001628>
- WANG, Quan J.; Walker, Glen, y Horne, Avril. (2018). *Potential impacts of groundwater sustainable diversion limits and irrigation efficiency projects on river flow volume under the Murray-Darling Basin Plan. An independent review*. University of Melbourne, Melbourne School of Engineering Water, Agriculture and Environment Program. <https://www.mdba.gov.au/sites/default/files/publications/impacts-groundwater-and-efficiency-programs-on-flows-october-20180.pdf>
- WARD, Frank A., y Pulido-Velázquez, Manuel. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *PNAS: Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47), 18215-18220. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805554105>
- WHEELER, Sarah A.; Carmody, Emma; Grafton, Quentin; Kingsford, Richard T., y Zuo, Alec. (2020). The rebound effect on water extraction from subsidising irrigation

- infrastructure in Australia. *Resources, Conservation & Recycling* (159), 104755. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104755>
- WILLARDSON, Lyman S.; Allen, Richard G., y Frederiksen, Harald Dixen. (1994, octubre 19-22). *Eliminating irrigation efficiencies* [Conferencia presentada]. 13th Technical Conference, USCID, Denver, Colorado. https://www.researchgate.net/publication/253580547_Eliminating_Irrigation_Efficiencies
- WILLIAMS, John, y Grafton, R. Quentin. (2019). Missing in action: possible effects of water recovery on stream and river flows in the Murray-Darling Basin, Australia. *Australasian Journal of Water Resources*, 23(2), 78-87. <https://doi.org/10.1080/13241583.2019.1579965>
- WILSON, Anna; Cifelli, Rob; Muñoz-Arriola, Francisco; Giovannettone, Jason; Vano, Julie; Parzybok, Tye; Dufour, Alexis; Jasperse, Jay; Mahoney, Kelly, y McCormick, Bill. (2021). Efforts to Build Infrastructure Resiliency to Future Hydroclimate Extremes. En Christopher L. Meehan, Miguel A. Pando, Ben A. Leshchinsky y Navid H. Jafari (eds.), *Geo-Extreme 2021* (pp. 222-233). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784483695.022>
- XIONG, Rui; Zheng, Yi; Han, Feng, y Tian, Yong. (2021). Improving the scientific understanding of the Paradox of Irrigation Efficiency: An integrated modeling approach to assessing basin-scale irrigation efficiency. *Water Resources Research* (57), e2020WR029397. <https://doi.org/10.1029/2020WR029397>