

Programas de saneamiento urbano en la frontera norte de México y el enfoque de economía circular

Urban sanitation programs on Mexico's northern border and the circular economy approach

Ismael Aguilar Benitez^{a*}  <https://orcid.org/0000-0003-4044-053X>

^a El Colegio de la Frontera Norte, Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente, Unidad Monterrey, Monterrey, México, correo electrónico: iaguilar@colef.mx

Resumen

En este artículo se analizan el Programa de saneamiento de la frontera norte estudio gran visión y el Programa estratégico de saneamiento de la frontera norte, ambos se formularon luego de la introducción del capítulo ambiental del T-MEC en 2020. Se examinan tres casos relevantes de ciudades fronterizas: Tijuana, Baja California; Nogales, Sonora; y, Nuevo Laredo, Tamaulipas. La investigación se basa en una revisión documental y entrevistas a informantes clave. Se encontró que las soluciones propuestas se apoyan principalmente en el desarrollo de infraestructura convencional, con una incorporación limitada de estrategias de reutilización, reciclaje y recuperación de materiales, energía y agua. El estudio enfatiza la importancia de una planeación que incorpore principios de economía circular y formas de infraestructura verde para mejorar la sostenibilidad de los proyectos de saneamiento en la región.

Palabras clave: saneamiento urbano, frontera norte de México, estrategias de economía circular, infraestructura verde, T-MEC.

Abstract

This study looks at the Northern border sanitation program gran vision study and the Northern border strategic sanitation program both programs were formulated after introducing the environmental chapter of the USMCA in 2020. The study examines three relevant cases of border cities: Tijuana, Baja California; Nogales, Sonora; and, Nuevo Laredo, Tamaulipas. The research is based on a documentary review and interviews with key informants. The study found that the proposed solutions were mainly based on conventional infrastructure projects, with limited incorporation of reuse, recycling and recovery strategies for materials, energy and water. The study emphasizes the

Recibido el 23 de abril de 2024.

Aceptado el 30 de octubre de 2024.

Publicado el 19 de noviembre de 2024.

*Autor para correspondencia: Ismael Aguilar Benitez. Correo electrónico: iaguilar@colef.mx



Esta obra está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Aguilar Benitez, I. (2024). Programas de saneamiento urbano en la frontera norte de México y el enfoque de economía circular. *Estudios Fronterizos*, 25, Artículo e155. <https://doi.org/10.21670/ref.2419155>

importance of holistic planning that incorporates circular economy principles and green infrastructure to improve the sustainability of sanitation projects in the region.

Keywords: urban sanitation, Mexican northern border, circular economy strategies, green infrastructure, USMCA.

Introducción

La problemática fronteriza de saneamiento y el T-MEC

Los flujos transfronterizos de aguas residuales sin tratar o que incumplen las normas establecidas en los acuerdos binacionales generan importantes impactos tanto ambientales como en la salud de las poblaciones fronterizas y consecuentemente en las relaciones diplomáticas México-Estados Unidos (Allen, 2020; Hargrove et al., 2018; Mumme, 2021). A inicios de la década de 1990 en las comunidades de ambos lados de la frontera predominaba la descarga de aguas residuales sin tratar, lo que constituía un alto riesgo para su población, la cual experimentaba altas tasas de enfermedades gastrointestinales y hepatitis (Allen, 2020; Giner et al., 2022; Hargrove et al., 2018).

A mediados de esa década y ante la intención de firmar el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), los temas ambientales, en particular el manejo del agua y el tratamiento de las aguas residuales en la frontera se convirtieron en asuntos prioritarios para la relación entre ambos países. Para poder atenderlos, en 1994 se fundaron la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN).¹ Para 2019, el BDAN había financiado parcialmente 133 proyectos de infraestructura de saneamiento en ambos lados de la frontera mediante subsidios y préstamos que aportaron casi 760 millones de dólares de un costo total de 1 900 millones de dólares (Allen, 2020).

Según algunos autores, las altas inversiones en infraestructura —sistemas convencionales de recolección, conducción y tratamiento de aguas residuales— han contribuido a mejorar de manera importante el saneamiento de aguas en las ciudades fronterizas de Estados Unidos (Giner et al., 2017, 2022). En el lado mexicano también se han reportado beneficios en la salud de los habitantes de la región derivados de una reducción a la exposición a descargas al aire libre de aguas residuales (García Ochoa et al., 2023; Giner et al., 2017).

Aunque no se cuenta con datos en series de tiempo sobre condiciones ambientales para la región, la calidad de las aguas de los cuerpos de agua registran algunas mejoras tangibles debidas a la inversión en infraestructura de saneamiento (Allen, 2020). Sin embargo, aún se registran flujos transfronterizos de aguas que incumplen la norma entre Tijuana-San Diego, Mexicali-Caléxico, Nogales, Sonora, y Nogales, Arizona, y a lo largo del río Bravo-río Grande (Allen, 2020; Comisión Internacional de Límites y Aguas [CILA], 2024; Dougherty, 2018; Mumme, 2021).

En 2020 la firma del Tratado Comercial entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC), para darle continuidad al TLCAN, generó expectativa en el gobierno

¹ En noviembre de 2017 la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el BDAN se fusionaron y este último continúa apoyando el desarrollo y financiamiento de infraestructura ambiental en la región fronteriza.

mexicano respecto a la necesidad de cumplir con los compromisos en materia de saneamiento debido principalmente a la inclusión de un capítulo ambiental. Esa preocupación por las implicaciones ambientales del T-MEC fue una de las principales razones para la formulación de dos programas de saneamiento: el Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión también conocido como Estudio de gran visión (en adelante EGV) publicado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) en 2021, y el Programa estratégico de saneamiento para la frontera norte (PESFN) formulado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), tomando como base el EGV.

Aunque el Capítulo 24 del T-MEC no incluye explícitamente los temas de agua y saneamiento, sí establece algunos compromisos específicos sobre asuntos ambientales, donde destacan obligaciones bajo los acuerdos multilaterales de medio ambiente en tres temas:

- a) la prevención, la reducción o control de una fuga, descarga o emisión de contaminantes ambientales;
- b) el control de productos químicos, sustancias, materiales o desechos peligrosos o tóxicos para el medio ambiente;
- c) la protección o conservación de la flora o fauna silvestres, incluso especies en peligro de extinción, su hábitat y las áreas naturales bajo protección especial (Artículo 24.1: Definiciones).

Un análisis legal del Capítulo 24 del T-MEC, reportado en el EGV, afirma que los mecanismos de penalización por incumplimiento ahora están activos e incluyen desde consultas técnicas hasta paneles para la solución de controversias y pueden presentarse incluso sanciones comerciales. (CILA, 2021a, Anexo 4). En efecto, el Artículo 24.27 establece un procedimiento directo por incumplimiento de obligaciones: “Cualquier persona de una Parte podrá presentar una petición que asevere que una Parte está incurriendo en omisiones en la aplicación efectiva de sus leyes ambientales”. Tales peticiones se presentarán en el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental.

Paralelamente, los gobiernos de México y Estados Unidos han realizado esfuerzos por desarrollar nuevas oportunidades de financiamiento y cooperación en materia ambiental. Por ejemplo, en diciembre de 2021 el Consejo Directivo del BDAN acordó extender su alcance crediticio para permitir inversiones en una mayor variedad de proyectos de infraestructura para enfrentar el cambio climático y promover una economía verde (BDAN, 2021). Resulta particularmente importante que en la declaración conjunta de la segunda reunión del comité de medio ambiente del T-MEC (septiembre de 2023) se menciona que en ese encuentro se presentaron áreas potenciales de colaboración en relación con el enfoque de economía circular (EC).

El reciente contexto del T-MEC presenta, por un lado, retos en temas ambientales que pueden derivar en potenciales sanciones comerciales por incumplimiento de compromisos binacionales en materia de saneamiento fronterizo. Por otro lado, presenta oportunidades para ampliar inversiones más allá de la infraestructura convencional de saneamiento bajo enfoques recientes como el marco de la EC.

En este trabajo se revisan los proyectos propuestos en el EGV y el PESFN para valorar si las estrategias planteadas en esos programas recuperan algunos principios de la EC en la planeación de infraestructura de saneamiento urbano fronterizo. Específicamente se analizan las problemáticas de saneamiento y las propuestas de proyectos de infraestructura planteadas como solución para tres ciudades fronterizas: Tijuana, Baja California; Nogales, Sonora; y, Nuevo Laredo, Tamaulipas. El objetivo de este análisis

es explorar las posibilidades de implementación de estrategias de EC y formas de infraestructura verde.

El escrito se estructura de la siguiente manera: a esta introducción le sigue una revisión conceptual del enfoque de EC y estrategias propuestas en agua y saneamiento urbanos, posteriormente se presenta un apartado metodológico; en el cuarto apartado se revisan la problemática fronteriza de saneamiento y los tipos de proyectos de infraestructura formulados para resolverla; posteriormente se revisan los tres casos de ciudades fronterizas. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

Enfoque y estrategias de economía circular en agua y saneamiento

Desde una perspectiva meramente funcional, los recursos naturales del territorio en el que las ciudades se localizan constituyen la base física que provee insumos para sus funciones y procesos. Bajo este enfoque, los sistemas urbanos han sido usualmente lineales en términos de sus procesos, a lo que también se le llama el arreglo tomar-usar-desechar (*take-make-waste*).

En el caso del agua para las ciudades, esta se obtiene de fuentes naturales ubicadas a largas distancias o se extrae de grandes profundidades; se usa para actividades industriales o comerciales y en las viviendas y se dispone de ellas desalojándolas al ambiente. Alternativamente, una visión de las ciudades como sistemas complejos que reciben transforman y reducen insumos, que generan productos y emiten residuos, lleva a una concepción del uso de los recursos distinta a la lineal (Novotny, 2011). Derivado de esa visión se ha propuesto el enfoque de EC. Una EC puede ser definida como:

Una economía construida a partir de sistemas sociales de producción-consumo que maximiza el servicio producido a partir del flujo de producción de energía y materiales naturaleza-sociedad-naturaleza. Esto se logra mediante el uso de flujos cíclicos de materiales, fuentes de energía renovable y flujos de energía en cascada. (Korhonen et al., 2018, p. 39, traducción propia)

Un principio central en el enfoque de EC es el uso restaurativo de los recursos según el cual los materiales no procesados no deberían convertirse en residuos (Geisendorf & Pietrulla, 2018). Esto implica también limitar el flujo de producción a un nivel que la naturaleza soporte y utilizar los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción natural (Korhonen et al., 2018).

El cambio de paradigma de un modelo lineal a uno circular es particularmente relevante en el contexto del saneamiento urbano, donde las aguas utilizadas a menudo se ven simplemente como un problema en lugar de un recurso valioso. Debido a que en una concepción lineal los procesos de saneamiento no consideran la recuperación de recursos, se registra una fuga de materia y energía, así como flujos de contaminación ambiental derivada de los procesos de tratamiento y un uso intensivo de energía no renovable (Daigger, 2009; Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos, 2017).

Uno de los aspectos clave de la EC en saneamiento es el reconocimiento de las aguas residuales como un recurso para la recuperación de nutrientes. El enfoque de EC destaca que cuando esas aguas y sus lodos se tratan adecuadamente pueden transformarse en fertilizantes, contribuyendo así al ciclo de nutrientes dentro de los sistemas agrícolas. Este enfoque no solo podría reducir la dependencia de los fertilizantes

sintéticos sino que también puede mitigar los impactos ambientales asociados con su producción y uso (Moya et al., 2019).

Otras estrategias clave de EC incluyen la reutilización del agua, el reciclado, la recuperación de agua, la producción y recuperación de energía y la restauración de las fuentes naturales de agua (Guerra-Rodríguez et al., 2020; Smol et al., 2020; Furness et al., 2023). En específico, la implementación de estrategias de EC en plantas de tratamiento de aguas residuales puede extender la vida útil de los equipos, optimizar el mantenimiento y reducir el impacto ambiental (Castellet-Viciano et al., 2022). Los humedales artificiales desempeñan también un papel crucial en este nuevo paradigma, ya que ofrecen soluciones de tratamiento económicamente viables y, al mismo tiempo, generan productos comercializables como fertilizantes y biocombustibles (Masi et al., 2018).

Las innovaciones en el tratamiento de aguas residuales, como la digestión anaeróbica y los sistemas bioelectroquímicos, pueden ser esenciales para mejorar la recuperación de recursos y la eficiencia energética (Ghimire et al., 2021). Estas tecnologías no solo mejoran la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento sino que también contribuyen a la EC al generar subproductos valiosos que pueden reintegrarse a las economías locales.

La aplicación de estrategias de EC también puede reducir la huella de carbono de las plantas de tratamiento de aguas residuales, alineándose con esfuerzos más amplios de mitigación ante el cambio climático (McKenna et al., 2022). Las tecnologías de extracción de energía de aguas residuales pueden transformar las plantas de tratamiento de aguas residuales en importantes productoras de energía, contribuyendo así a los objetivos de carbono cero (Rani et al., 2022).

No obstante, la transición hacia una economía circular en el sector del saneamiento requiere marcos de gobernanza sólidos que faciliten la implementación de sistemas de gestión de residuos y saneamiento orientados a los recursos. Esto subraya la necesidad de esfuerzos colaborativos entre los gobiernos, los actores del sector privado y la sociedad civil para crear entornos propicios para iniciativas de saneamiento circular (Ddiba et al., 2020).

Basados en una revisión de literatura especializada, Morsetto y colaboradores (2022) proponen un conjunto de ocho estrategias para gestionar el agua de manera circular, al tiempo que identifican algunos desafíos normativos, de gobernanza y de implementación que deben abordarse para facilitar la transición a una economía circular del agua. Las estrategias propuestas por su relevancia y aplicabilidad al agua son organizadas en tres categorías: disminuir (evitar, reducir, reemplazar), optimizar (reutilizar, reciclar, uso en cascada) y preservar (almacenar y recuperar).

Mientras que evitar el uso de agua implica no utilizarla en alguna actividad, reducir su uso consiste en usar un menor volumen que el habitual. Reemplazar, por otra parte, significa sustituir al agua por alguna otra sustancia en algunos procesos, esto tal vez sería factible en usos como el industrial. Morsetto y colaboradores distinguen entre reutilizar y reciclar y proponen que mientras reutilizar puede entenderse como utilizar agua de nuevo para el mismo o diferente propósito sin ningún tratamiento, esto es con la misma calidad o con un nivel de alteración que no impide un uso posterior, reciclar implica usar nuevamente un volumen de agua después de un tratamiento para obtener un nivel de calidad que requiere ese uso posterior.

En la categorización de estrategias de Morsetto, el uso en cascada consiste en una secuencia de usos consecutivos del agua (por ejemplo, en una planta industrial para

enfriamiento, primero, en limpieza, posteriormente, y finalmente en sanitarios), esta estrategia requiere tanto de la proximidad física de los usos como de tecnologías que funcionen en sinergia.

Preservar agua comprende dos estrategias, una, almacenar agua para usos futuros, lo cual puede implicar o no un tratamiento previo o posterior al almacenamiento, y la segunda consiste en recuperar materiales y energía. La adopción de esa estrategia es directa en el saneamiento mediante la recuperación del agua tratada y los subproductos del tratamiento como los lodos, en los cuales se puede recuperar agua, nutrientes y energía (Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos, 2017). Los lodos que resultan de procesos de saneamiento tienen un alto contenido orgánico y es factible utilizar directamente el tratamiento anaerobio para la recuperación de gases y así posibilitar la generación de energía eléctrica (Aguilar-Benitez & Blanco, 2018).

La infraestructura verde puede constituirse también como un mecanismo para implementar estrategias de EC. La infraestructura verde hídrica se refiere en general a los sistemas naturales o seminaturales que implican un esfuerzo deliberado y consciente para utilizar los servicios ecosistémicos a fin de proporcionar beneficios para una gestión sustentable del agua (Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos, 2018).

Algunas formas de infraestructura verde son: los humedales construidos, techos verdes o jardines de lluvia. La creación de infraestructura verde es una estrategia que se puede implementar en apoyo a infraestructura de drenaje pluvial convencional para desviar el caudal de escorrentías, así como controlar el arrastre de sedimentos al sistema de drenaje sanitario. La renaturalización de cauces y la restauración del hábitat ripario también puede asociarse al pulimento de aguas tratadas, al mismo tiempo que mejora el hábitat acuático y el caudal ecológico.

El saneamiento puede incluso favorecer el acceso a agua potable si se implementa el potencial de reciclamiento de aguas de manera adecuada para uso humano indirecto y así sustituir volúmenes importantes de agua de primer uso en actividades que requieren una calidad menor, como la industria y la agricultura.

Sin embargo, es necesario identificar formas óptimas para la implementación de las prácticas y estrategias de EC y así aprovechar plenamente su potencial en la gestión de aguas residuales (Guerra-Rodríguez et al., 2020; Kundu et al., 2022). Es importante reconocer que el enfoque de EC puede encontrarse con varios retos para su implementación, los más importantes son: el marco normativo, los costos, la tecnología y la percepción de los potenciales usuarios (Frijns et al., 2024; Kakwani & Kalbar, 2020).

En México existen varias normatividades (Norma Oficial Mexicana [NOM]) que deben cumplirse para poder implementar estrategias de EC en agua. Entre las más importantes, la NOM003-Semarnat-1997 establece límites máximos permisibles para utilizar aguas tratadas en servicios al público para contacto directo o contacto indirecto u ocasional que implementen entidades públicas. Esta norma limita por ejemplo el uso recreativo con contacto físico directo con aguas tratadas.

La NOM-001-Ecol-1996 establece estándares para el reciclado de aguas en embalses naturales y artificiales utilizados para riego agrícola. La NOM-001-Semarnat-2021 establece los estándares de aguas tratadas para el riego de áreas verdes. La NOM-014-Conagua regula la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. La NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, establece en su artículo 1.3 que esta norma no aplica para aguas residuales tratadas y especifica en el artículo 5.1 que: "El agua de los sistemas de abastecimiento no debe tener como fuente de abastecimiento agua residual tratada". Por lo tanto, el uso humano directo es muy restringido.

Una limitante para promover el uso industrial de aguas tratadas es la diferencia de tarifas; la tarifa de agua tratada es menor que la de agua potable mientras que los costos de inversión son altos, por ejemplo en líneas moradas para su distribución (R. Laborín, comunicación personal, 7 de junio de 2022).

Las tarifas de agua tratada menores a las de agua potable se utilizan para atraer con menores costos a la industria para que sustituya su uso de agua de primer uso. Sin embargo, el transporte de las aguas tratadas en plantas localizadas generalmente lejos del centro de las zonas urbanas y los parques industriales requieren grandes inversiones para la construcción de líneas moradas y el bombeo con el consecuente costo de electricidad.

Por otro lado, también se compite en el mercado de agua tratada con la industria que posee derechos de aprovechamiento y los costos de esos derechos pueden ser menores al costo por tarifa de agua tratada. Esta situación puede hacer muchas veces financieramente inviable la sustitución de agua de primer uso con agua tratada en el uso industrial.

Algunos aspectos técnicos que pueden limitar el reciclado de aguas es que se requiere de regularidad en el flujo de las aguas tratadas y una calidad constante, lo que implica una operación eficiente de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El reciclado de aguas para uso potable tiene como principales limitantes los riesgos a la salud pública y su rechazo por los potenciales usuarios debido al factor repugnancia, con una base psicológica (Rozin et al., 2015).

Las aguas tratadas aún pueden contener contaminantes peligrosos como patógenos, microcontaminantes y genes resistentes a los antibióticos, lo que plantea desafíos para una reutilización segura (Guerra-Rodríguez et al., 2020).

Informar sobre el proceso de reciclaje, la calidad del agua, los beneficios para la fuente y que el reciclaje se practica en otros lugares puede mejorar la confianza y aceptación de agua reciclada para uso humano directo (Fielding et al., 2019). Una propuesta surgida recientemente es denominar a las aguas tratadas como aguas recuperadas o aguas regeneradas, lo cual podría incentivar su aceptación pública. No obstante esas limitantes, la adopción de los principios de la EC en la gestión de aguas residuales puede contribuir al desarrollo sostenible y la seguridad de los recursos.

En la siguiente sección se presenta la metodología de investigación utilizada en este trabajo.

Metodología

En este trabajo se aplicó un enfoque metodológico cualitativo integrado por dos componentes: el primero consistió en una revisión documental general de los dos programas de saneamiento objeto de estudio, así como de materiales complementarios; el segundo componente fue el análisis de tres estudios de caso seleccionados, complementados con entrevistas a informantes clave.

La revisión documental se enfocó en identificar en la literatura académica y en documentos oficiales y literatura gris el estado de la problemática de saneamiento en la región fronteriza, así como la planeación de infraestructura formulada e implementada para atenderla. En particular se revisó la documentación de dos programas: el EGV y el PESFN, ambos formulados entre 2021 y 2022, además de documentos oficiales relacionados (actas de la CILA, presupuesto de egresos, entre otros).

El EGV incluye una amplia documentación con un informe general y 15 informes específicos, uno para cada una de trece ciudades fronterizas y de dos regiones. Por otra parte, los proyectos del PESFN se registraron en los programas hídricos regionales de las tres regiones hidrológico-administrativas (RHA) que cubren los seis estados fronterizos, publicados por la Conagua: Región Hidrológico-Administrativa (RHA) I Península de Baja California (Conagua, 2021a), RHA II Noroeste (Conagua, 2021b) y RHA VI Río Bravo (Conagua, 2021c).

Para la selección de los tres casos se tomaron como criterios principales: la presencia de flujos de aguas residuales entre zonas urbanas colindantes en la frontera; los impactos binacionales en la problemática fronteriza de saneamiento registrados con la firma de acuerdos en actas de la CILA; y la presencia de una planta internacional de tratamiento de aguas residuales (PITAR), como indicador de un sistema de saneamiento con una alta interdependencia. Otros indicadores importantes tomados en cuenta fueron el tamaño y la tasa de crecimiento de la población.

Para identificar las posibilidades de implementación de estrategias de economía circular en cada caso se adoptó la propuesta de categorías de Morsetto y colaboradores (2022) y las formas de infraestructura verde identificadas por el Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos (2018). En lo relativo a estrategias de EC, en cada uno de los tres informes específicos de los proyectos se buscó identificar medidas para evitar, reducir, reemplazar volúmenes de agua de primer uso; mecanismos para reutilizar y/o reciclar volúmenes de agua y/o materiales; acciones para promover el uso en cascada del agua; iniciativas para almacenar agua para usos futuros y recuperar materiales y energía de las aguas residuales. Con respecto a infraestructura verde se buscó identificar sus principales formas: la construcción de humedales, el establecimiento de espacios verdes para biorretención e infiltración, techos verdes o el uso de pavimentos permeables.

Para complementar la información documental de esos tres casos se realizaron entrevistas a informantes clave —funcionarios, exfuncionarios y líderes de organizaciones civiles, expertos en temas de saneamiento fronterizo— con amplia experiencia en al menos una de las tres ciudades seleccionadas como casos de estudio. Se realizaron entrevistas a siete informantes mediante videoconferencias y llamadas telefónicas en el periodo junio-julio de 2022.²

Cada entrevista incluyó tres temas principales, planteados con preguntas abiertas: primero, la problemática fronteriza de saneamiento en cada ciudad (Tijuana, Nogales y Nuevo Laredo); segundo, la prioridad en cada caso para la inversión binacional en proyectos de saneamiento; y tercero, se les pidió a los entrevistados identificar las

² Los informantes clave entrevistados para este trabajo fueron: Hernando Durán Cabrera, exdirector de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) y miembro del Consejo Directivo de Tijuana Innovadora (organización de la sociedad civil); Carlos de la Parra, miembro del Consejo Directivo del Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) y Chair of the Board of Directors de Restaremos el Colorado, A.C.; Rigoberto Laborín Valdéz, exdirector de la CESPT, exsubsecretario técnico de Saneamiento de la Secretaría para el Manejo, Saneamiento y Protección del Agua (Seproa), del Gobierno del Estado de Baja California; Óscar Ibañez, representante de la gobernadora de Chihuahua en Ciudad Juárez y exdirector de la Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua; David Negrete Arroyos, quien ha sido representante de la CILA por más de 25 años en Nuevo Laredo, Ciudad Juárez y Reynosa; Claudia Gil, exdirectora general del Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Nogales, especialista en ciencias ambientales del Arizona Department of Environmental Quality; y Joaquín Marruffo, exgerente de proyectos del BDAN, gerente de la unidad de programas fronterizos en el Arizona Department of Environmental Quality. El autor agradece su importante colaboración para este trabajo.

alternativas de proyectos que se pueden implementar bajo el enfoque de EC o de infraestructura verde.

Cuatro entrevistas se realizaron por videoconferencia y se realizó la transcripción del video correspondiente; en tres casos los entrevistados prefirieron hacer la entrevista vía telefónica. Se analizaron los textos de transcripciones y notas de entrevistas y se categorizó la información relevante para cada tema utilizando dos dimensiones principales: el enfoque de EC e infraestructura verde; y como categorías las estrategias propuestas por Morsetto y colaboradores (2022) y las formas de implementación de infraestructura verde.

Posteriormente se contrastó temáticamente esa información con la contenida en informes específicos y fuentes secundarias (publicaciones de organismos binacionales, principalmente Environmental Protection Agency (EPA), CILA y BDAN, periódicos, entre otras).

Los programas de saneamiento en la frontera norte

Las principales organizaciones involucradas en el manejo del agua y saneamiento en la frontera entre México y Estados Unidos son, en el lado mexicano, la Secretaría de Relaciones Exteriores, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) y su contraparte, del lado estadounidense, la International Boundary and Water Commission, así como la EPA. Estos organismos se proponen atender la problemática fronteriza mediante acciones colaborativas y compromisos registrados en “Actas”, mecanismo establecido en el Tratado Internacional de Aguas de 1944.³

Para 2024, de un total de 330 actas firmadas, 47 (14%) establecen acuerdos sobre problemáticas de saneamiento. Una de las más importantes es el Acta 261, firmada en 1979, titulada “Recomendaciones para la solución de los problemas fronterizos de saneamiento”. En ese documento se definen los problemas de saneamiento en la frontera como:

Cada uno de los casos en que las aguas que crucen la frontera, incluyendo las aguas costeras, o escurran por los tramos limítrofes de los ríos Bravo y Colorado, tengan condiciones sanitarias tales que representen un riesgo para la salud y el bienestar de los habitantes de cualquier lado de la frontera o impidan el uso benéfico de dichas aguas. (Acta 261, firmada el 24 de septiembre de 1979 en El Paso, Texas)

En 1995 se firmó el Acta 294, titulada “Programa de consolidación de proyectos para la solución de los problemas fronterizos de saneamiento”, a partir de la cual se aportan fondos tanto por México, a través de la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap), como por Estados Unidos por medio de la EPA, para la construcción de proyectos de infraestructura (International Boundary and Water Commission, 1995). En 1997 se creó el Fondo de Infraestructura Ambiental Fronteriza, conocido como BEIF por sus siglas en inglés (Border Environmental Infrastructure Fund), administrado por el BDAN para canalizar recursos a fondo perdido.

³ Denominadas como Actas CILA, en adelante Actas para hacer referencia a estos documentos. Las actas pueden ser consultadas en: <https://cila.sre.gob.mx/cilanorte/index.php/boletin/11-doctos/55-orden-cronologico>

A lo largo de la frontera se han construido tres plantas internacionales de tratamiento de aguas residuales (PITAR) para tratar de evitar descargas sin tratar en el río Bravo/Grande; dos ubicadas en Estados Unidos que reciben aguas residuales crudas de México (PITAR Río Rico, Arizona, 1972; PITAR CILA/South Bay en San Diego, 1999) y otra ubicada en México (PITAR Nuevo Laredo, 1996). El funcionamiento de estas plantas implica distintas responsabilidades para las ciudades fronterizas mexicanas. Mientras en Tijuana y Nogales el compromiso consiste en no exceder los volúmenes acordados de aguas residuales que crucen la frontera para su tratamiento, en el caso de Nuevo Laredo su responsabilidad es operar la PITAR y darle un adecuado mantenimiento para tratar las aguas del lado mexicano. La CILA sección mexicana supervisa la operación, costos y mantenimiento en el caso de la PITAR Nuevo Laredo.

En 2000 se creó el Programa de inversiones conjuntas para proyectos de infraestructura de agua potable y saneamiento para las poblaciones en la franja fronteriza entre México y Estados Unidos. En el Acta 304 se estableció que los fondos proporcionados por la EPA para financiamiento de proyectos a través del BDAN podrían aplicarse para proyectos en México o en Estados Unidos y que esos fondos deberían igualar los subsidios otorgados por México. En contraste, los fondos aportados por México solo se aplican a proyectos del lado mexicano.

En 2003 se formó el Programa ambiental frontera 2012 (PAF 2012), el objetivo principal de este programa fue reducir la contaminación de las aguas en la región. En el informe de resultados del PAF 2012 se reportó que más de 500 000 viviendas fueron conectadas a servicios de recolección y tratamiento de aguas residuales. Posteriormente, a mediados de 2012 se firmó el Programa ambiental frontera 2020 (PAF 2020). En la meta 2 del PAF 2020 se propuso: mejorar el acceso a agua limpia y segura, y se estableció para 2015 la meta de promover que al menos 42 000 hogares tuvieran acceso a servicios adecuados de alcantarillado y saneamiento.

Al PAF 2020 se le dio continuidad con el Programa ambiental frontera 2025 (PAF 2025). Un aspecto importante de ese programa es que, dentro del objetivo 4, se plantean como acciones específicas: promover el reciclado de las aguas residuales tratadas, la conservación de agua de primer uso y de energía. Se propone que 100% de los proyectos del Programa de inversiones conjuntas para proyectos de infraestructura de agua potable y saneamiento para las poblaciones en la franja fronteriza entre México y Estados Unidos seleccionados para el desarrollo incluyan una evaluación de las oportunidades de reciclado del agua.

Ante las posibles implicaciones del capítulo ambiental 24 del T-MEC, la CILA comisionó en 2021 la formulación del Programa de saneamiento de la frontera norte, estudio de gran visión (EGV).⁴ La Conagua retomó este estudio y en 2022 formuló el Programa estratégico de saneamiento de la frontera norte (PESFN). El objetivo general del EGV fue “Identificar las acciones y alternativas que México requiere para atender de forma integral los problemas fronterizos de saneamiento, sus impactos en la salud pública al 2050 y propiciar el cuidado del medio ambiente” (CILA, 2024). Se buscaba que el EGV se convirtiera en el instrumento de programación y presupuesto para maximizar inversiones en la problemática fronteriza de saneamiento.

El EGV caracteriza la problemática de saneamiento de trece ciudades fronterizas de manera individual y de dos regiones en las que agrupa a varias localidades suburbanas

⁴ Este estudio fue asignado a FG y Asociados mediante licitación pública nacional en la convocatoria núm. CILA-JUA-LPN-6-2020.

y rurales pequeñas (el Valle de Juárez y la Frontera Chica de Tamaulipas, véase Figura 1).⁵ En general los proyectos identificados en el EGV y retomados en el PESFN se pueden clasificar en la construcción, ampliación y rehabilitación de redes de alcantarillado, cárcamos de bombeo y plantas de tratamiento, así como en la elaboración de diagnósticos y proyectos ejecutivos.

En el EGV se identifican algunas iniciativas existentes para el reciclado de aguas en cuatro ciudades: Tijuana, Tecate, Ciudad Juárez y Nuevo Laredo. Los proyectos propuestos para promover el reciclado son la ampliación de líneas moradas y mejorar el bombeo de aguas. En general, un bajo porcentaje (menor a 10%) de aguas tratadas se reutiliza en cada ciudad, excepto Acuña y Piedras Negras, Coahuila, en donde en su totalidad se utilizan en la generación de energía eléctrica.

Algunos criterios generales de sustentabilidad definidos para evaluar los proyectos de infraestructura de saneamiento en el EGV son: la ubicación de las instalaciones en zonas seguras; redundancia en el sistema, por ejemplo, con procesos de tratamiento que puedan tolerar variaciones de cargas orgánicas y que sean de fácil operación; y preferencia a los sistemas por gravedad en reemplazo de sistemas electromecánicos (CILA, 2021a, p. 149).

Además, en su informe general el EGV consideró cuatro criterios de resiliencia en el dimensionamiento de alternativas de proyectos de infraestructura convencional (procesos de captación, tratamiento y conducción): robustez, redundancia, recursos para la adaptación y rapidez de recuperación de los niveles de servicio. No obstante, se menciona que la implementación de la resiliencia puede resultar altamente costosa y puede detonar conflictos sociales, por lo que en general no se evalúan como opciones preferentes (CILA, 2021a).

En la Tabla 1 se presenta información sobre población, cobertura de drenaje, saneamiento e inversión estimada para proyectos de infraestructura de las trece ciudades y dos regiones fronterizas diagnosticadas en el EGV. El total de inversión estimada para un portafolio de 868 proyectos de infraestructura con un horizonte temporal para 2050 es de 44 610 millones de pesos. Se asume en el EGV que un porcentaje de esas inversiones (30%) provendrá de fondos de la EPA a través del BDAN. A pesar de que una operación inadecuada y un mantenimiento deficiente son dos de las principales causas de los flujos transfronterizos de aguas residuales, el BDAN no asigna presupuesto a esos rubros, lo cual puede ser explicado debido a que el Congreso de Estados Unidos no lo autoriza a la EPA (Elmer, 2021).

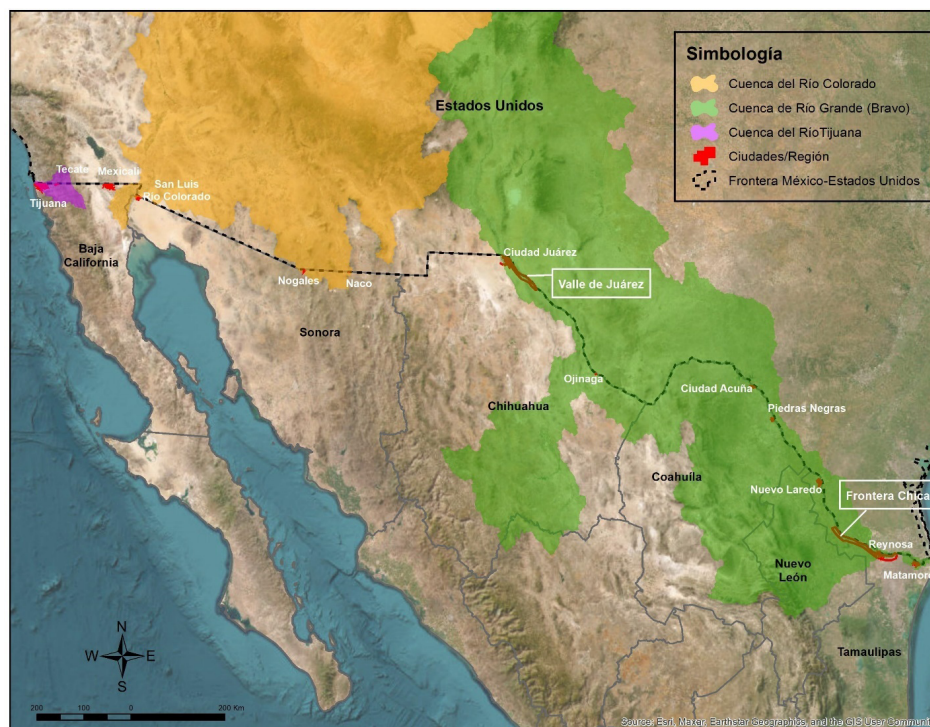
Un dato importante es que, en promedio en las ciudades fronterizas, 99% de la población —con la excepción de algunas comunidades rurales del Valle de Juárez— se encuentra conectada a servicios de drenaje. Estos datos indican que la principal problemática de saneamiento en ciudades mexicanas de la frontera no es la cobertura de drenaje, pero sí los crecientes volúmenes de tratamiento de aguas residuales requeridos por el aumento constante de la población. En algunas de las ciudades fronterizas como Reynosa, hasta 50% de aguas residuales no es tratada (Leija McDonald et al., 2022).

Con respecto a población, Tijuana es la ciudad fronteriza de mayor tamaño y dinamismo en crecimiento. En 2020 la ciudad de Tijuana ya había rebasado la proyección estimada para 2030 por el Consejo Nacional de Población (Conapo).

⁵ La región que se denomina como Valle de Juárez comprende las siguientes localidades fronterizas de Chihuahua: San Isidro-Loma Blanca, El millón-San Agustín-Jesús Carranza-Tres Jacales, Porfirio Parra-Barreales-Juárez y Reforma, Guadalupe, Praxedis G. Guerrero, Colonia Esperanza, y El porvenir. En la región Frontera Chica se agrupan siete ciudades de Tamaulipas: Nueva Ciudad Guerrero, Mier, Miguel Alemán, Ciudad Camargo, G. Díaz Ordaz, Río Bravo y Nuevo Progreso.

Como es evidente, el crecimiento de población se refleja en la necesidad de una mayor inversión en infraestructura. De la inversión proyectada, 32.6% se concentra en Tijuana.

Figura 1. Ciudades fronterizas mexicanas y su ubicación en tres cuencas transfronterizas



Fuente: elaboración propia

La Conagua retomó varios de los proyectos identificados en el EGV y los incorporó en el PESFN. El objetivo del PESFN es “Impulsar con el apoyo de los tres niveles de gobierno de la república mexicana y actores internacionales, acciones necesarias en materia de saneamiento en los municipios que influyen en la línea fronteriza mexicana” (Conagua 2021a, p. 234). El PESFN identifica 516 acciones y un monto estimado de inversión de 23 823.85 millones de pesos. De esas acciones, 126 se ubican dentro del programa de inversiones conjuntas EPA-Conagua con una inversión de 8 900 millones de pesos; de ese monto a invertir la Conagua espera que la EPA aporte 3 700 millones de pesos. Existe una diferencia notable en la cantidad de acciones y financiamiento estimado entre ambos programas.

El registro de los proyectos que requieren de inversión conjunta en los programas por cuenca hidrológica-administrativa de la Conagua puede considerarse como un primer paso para su certificación y financiación dentro del Programa de inversiones conjuntas EPA-Conagua. Al respecto, el 14 de diciembre de 2021, derivado de la propuesta de un senador por Chihuahua sobre una estrategia para enfrentar la sequía en

el norte del país, el senado de la república aprobó un acuerdo en el que solicita a la Conagua la actualización de una estrategia integral de gestión de aguas nacionales, con un mayor énfasis en los estados y municipios de la frontera norte.⁶

Tabla 1. Población, tasas de crecimiento y proyecciones de inversión en saneamiento de las ciudades fronterizas a 2030

Municipio/localidad	Población 2020	Tasa de crecimiento 2010-2020	Población 2030 (proyección Conapo)	Vivienda sin drenaje (%)	Volumen requerido de saneamiento l/s	Inversión estimada EGV (millones de pesos)
Tijuana, B. C.	1 922 523	23%	1 910 948	0.16	2 990	14 555
Tecate, B. C.	108 440	7%	119 223	0.34	170	894
Mexicali, B. C.	1 049 792	12%	1 245 707	0.16	1 943	6 049
Nogales, Sonora	264 782	20%	268 419	0.17	713	1 740
San Luís Río Colorado, Sonora	199 021	11.6	226 017	0.25	327	1 333
Naco, Sonora	5 774	-10%	6 987	0.46	19	231
Ciudad Juárez, Chihuahua	1 512 450	13%	1 517 811	0.09	4 555	11 590
Valle de Juárez, Chihuahua	22 197	—	9 348	.65-.92	76	85.3
Ojinaga, Chihuahua	24 534	-7%	33 756	0.09	95	218
Nuevo Laredo, Tamaulipas	425 058	11%	434 412	0.08	1 283	1 218
Piedras Negras, Coahuila	176 327	15%	228 121	0.11	635	1 949
Acuña, Coahuila	163 058	19%	168 952	0.17	456	1 225
Reynosa, Tamaulipas	704 767	15%	916 924	0.06	2 143	2 006
Matamoros, Tamaulipas	541 979	11%	569 325	0.18	1 687	869
Frontera Chica, Tamaulipas	201 132	—	222 907	0.24	121	648

Fuente: elaboración propia con datos de CILA (2021a), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (s. f.) y Conapo (2021)

En enero de 2022, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales respondió con un oficio en donde solicita la creación de un programa presupuestal especial-saneamiento de la frontera norte para financiar proyectos de saneamiento, elaborar diagnósticos y proyectos ejecutivos del PESFN. Sin embargo, ese programa no fue incluido en el presupuesto de egresos de 2023 ni en el de 2024. El único proyecto con presupuesto asignado para 2024 en la frontera norte fue la rehabilitación de la presa internacional La Amistad en Coahuila (\$188 686 241).

⁶ Ficha técnica del resolutivo aprobado disponible en: https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_del_senado/ficha/proposicion/20377

Oficio de repuesta de Conagua disponible en la página electrónica del Sistema de Información Legislativa: https://infosen.senado.gob.mx/infosen/CCTP/RESPUESTAS/2023-09-05/DGPL_1P1A_3827_MEDI_O_AMBIENTE_SEQUIA.pdf

Problemáticas de saneamiento y estrategias de economía circular en tres ciudades fronterizas: Tijuana, Nogales y Nuevo Laredo

En esta sección se revisan las problemáticas de saneamiento de tres ciudades fronterizas mexicanas —Tijuana, B. C., Nogales, Sonora, y Nuevo Laredo, Tamaulipas— con base principalmente en los informes específicos del EGV para cada uno de los tres casos, complementados con fuentes secundarias y las entrevistas a informantes clave. Se identificaron para cada ciudad las posibilidades de implementación de estrategias de economía circular del agua como reciclado de aguas, utilización de aguas tratadas, implementación de infraestructura verde (por ejemplo, humedales construidos) y elementos de sostenibilidad energética.

Problemática de saneamiento en Tijuana, Baja California

En 2020, la población en Tijuana, Baja California era de 1 922 523 habitantes, con la tasa de crecimiento más alta para ciudades fronterizas mexicanas (23.2%) en el periodo 2010-2020. Tijuana tiene una alta relevancia en la problemática fronteriza de saneamiento dada su vecindad con el condado de San Diego, California. Ambas zonas urbanas comparten flujos de aguas por los ríos que fluyen de sur a norte y cruzan la frontera (véase Figura 2). El sistema de saneamiento de Tijuana cuenta con 18 plantas de tratamiento, las cuatro principales son: PITAR South Bay, PTAR San Antonio de los Buenos (SAB, también conocida como Punta Banderas), PTAR Arturo Herrera y PTAR La Morita. La capacidad total instalada de tratamiento es de aproximadamente 3 000 l/s (CILA, 2021b).

El funcionamiento del sistema de saneamiento se basa en concentrar los caudales de agua residual en la PITAR South Bay y la PTAR SAB. La PITAR trata alrededor de 30% del volumen captado (H. Durán, comunicación personal, 9 de junio de 2022). La planta SAB, construida en 1987, fue rehabilitada en 2003 para incrementar su capacidad de 750 l/s a 1 100 l/s, sin embargo, no opera de manera adecuada, al menos desde 2004 (C. de la Parra, comunicación personal, 15 de junio de 2022; R. Laborín, comunicación personal, 7 de junio de 2022).

Las descargas de la PTAR SAB al océano y el río Tijuana son las dos fuentes principales de flujos transfronterizos de aguas residuales sin tratar, lo que causa una persistente problemática ambiental binacional. La tubería de SAB hacia el océano descarga aguas residuales que son transportadas por las corrientes hacia el norte, principalmente en los meses de verano, lo que impacta en Imperial Beach. El sistema de saneamiento de Tijuana cuenta con más de 3 800 km de redes principales de alcantarillado de las cuales 57% presentan fallas por desgaste que pueden derivar en escurrimientos hacia el río Tijuana (CILA, 2021b).

En la zona del río Tijuana-arroyo Alamar descargan los escurrimientos superficiales de aguas residuales generadas por asentamientos humanos irregulares de zonas aledañas, carentes de drenaje sanitario. La proliferación de vegetación y basura sobre el río Tijuana, canalizado para evitar inundaciones, trae como consecuencia el arrastre recurrente de material sólido, que se agrega a sedimentos que desembocan en el océano Pacífico y se convirtió así en un canal de aguas mezcladas y azolve que se conduce al mar y a un estero que es reserva ecológica (C. de la Parra, comunicación personal, 15 de junio de 2022).

La planta de bombeo PB-CILA, construida en 1991, bombea las aguas tratadas y sin tratar en tiempo de estiaje, debido a que aumentan los flujos que escurren por el cauce del río Tijuana, usualmente confinados al canal revestido, para que no crucen la frontera. Este sistema bombea el agua del río Tijuana que conduce una mezcla de aguas tratadas de las PTAR Arturo Herrera y La Morita, así como las provenientes de Tecate y escurrimientos de la presa, para evitar que esas aguas crucen la frontera con Estados Unidos, aunque frecuentemente su capacidad es rebasada y su costo muy alto (H. Durán, comunicación personal, 9 de junio de 2022; R. Laborín, comunicación personal, 7 de junio de 2022). Cuando se registran fallas operativas en la PB-CILA o flujos mayores a su capacidad operativa resultan flujos transfronterizos.

La problemática fronteriza de saneamiento en Tijuana ha derivado en la firma de diversas actas CILA (270, 283, 298 y 320). En 2017, debido a las fuertes lluvias de diciembre de 2016 y enero de 2017, el agua pluvial entró al sistema de recolección de aguas residuales y provocó la ruptura de un colector sanitario lo que ocasionó descargas al río Tijuana que cruzaron la frontera internacional.⁷

La Conagua registró que en el periodo de 2019 a 2021 los tres niveles de gobierno invirtieron 46 millones de dólares para proyectos de saneamiento del río Tijuana. Uno de los proyectos más importantes fue la expansión y modernización de la planta de bombeo PB-CILA. A finales de 2021, la EPA reportó planes para invertir 300 millones de dólares para reducir los flujos transfronterizos de aguas residuales.

Un tema a discusión fue el destino de esa inversión, las opciones eran: 1) reducir los flujos del lado mexicano incluso con una propuesta de reciclado de aguas mediante filtración natural con destino a una presa o; 2) mejorar la capacidad de tratamiento del lado de Estados Unidos (R. Laborín, comunicación personal, 7 de junio de 2022; Elmer & Calderón, 2021). No obstante la problemática persistió, en junio de 2023 se reportó un derrame de aguas sin tratar, debido a la rotura de un tubo del cárcamo de alejamiento, que afectó hasta 40 km de océano durante varios meses, lo que provocó el cierre de playas en ambos lados de la frontera (KSDY50 San Diego, 2023).

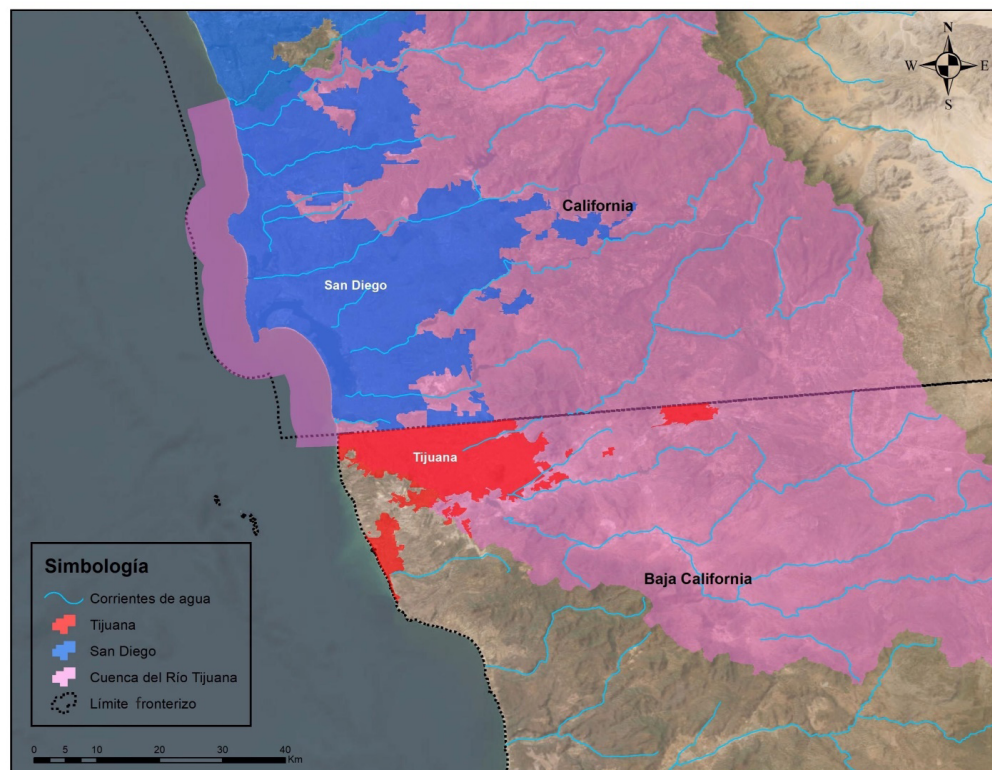
El informe del EGV para Tijuana propuso en general la rehabilitación y ampliación de los sistemas de alcantarillado y saneamiento. Algunos proyectos específicos propuestos fueron: la construcción de un cárcamo de bombeo para recolectar las aguas residuales generadas en la cuenca del cañón de Sainz; la construcción de una línea de conducción con una nueva obra de toma del río Tijuana para minimizar la posibilidad de cruces transfronterizos de aguas. No se incluyeron proyectos relacionados con la recuperación de materiales, de lodos o de gases para generación de energía eléctrica. Tampoco se propuso el uso de humedales construidos para pulimento de aguas residuales o alguna forma de infraestructura verde.

En julio de 2022, la Conagua y la EPA firmaron una declaración de intención para la implementación de los siguientes proyectos: duplicar la capacidad de la PTAR, la rehabilitación y readecuación de la PTAR SAB, así como la rehabilitación de líneas primarias de alcantarillado y plantas de bombeo. En agosto de 2022 entró en vigor el Acta 328 "Proyectos de infraestructura de saneamiento en Tijuana, Baja California-San Diego, California, para implementación inmediata y para desarrollo futuro", mediante la cual se acordó la construcción de 17 proyectos de saneamiento en Tijuana y San Diego,

⁷ El Grupo Técnico Binacional del Acta 320 y el Grupo de Trabajo de la Calidad del Agua llevaron a cabo una investigación sobre este evento, se estimó un volumen derramado de 143 millones de galones: <http://www.cila.gob.mx/syca/idarrt0417.pdf>

con un costo aproximado de 474 millones de dólares, en un periodo de cinco años (Conagua, 2023). Esto implica que Tijuana concentra el mayor monto de inversión binacional reciente ejercido y comprometido para infraestructura de saneamiento en la frontera México-Estados Unidos.

Figura 2. Tijuana, Baja California-San Diego, California



Fuente: elaboración propia

En el marco del Programa de inversiones conjuntas Conagua-EPA se establece que la Conagua apoyará con financiamiento los proyectos para alejamiento y reciclado de los efluentes de las PTAR Arturo Herrera y La Morita, la rehabilitación del colector internacional y la rehabilitación de las plantas de bombeo PB-1, Laureles 1 y 2 y Madero (Secretaría de Relaciones Exteriores, 2023). No obstante, en 2024 no se asignó presupuesto en el Ramo 16, correspondiente a la Semarnat, para ningún proyecto de saneamiento en Tijuana.

Potenciales estrategias de EC en el sistema de saneamiento de aguas en Tijuana, Baja California

Se estima que en Tijuana, en general, se recicla solamente 6% de las aguas. La infraestructura de reutilización de aguas tratadas consiste en una línea que empieza en la PTAR Arturo Herrera y envía agua residual tratada al parque Morelos, al panteón

Monte de los Olivos y al club de golf Campestre (CILA, 2021b). En los terrenos de la PTAR SAB se utiliza agua tratada para regar un vivero. En 2019 se comenzó a dotar de aguas tratadas a la empresa Samsung.

En 2015 la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) elaboró un estudio en el cual se identificaron tres alternativas de utilización de aguas tratadas para la recarga de acuíferos; 1) reciclar toda el agua de la cuenca del río Tijuana y Alamar, incluida la de la PTAR. 2) Similar a la primera pero sin incluir el agua de la PTAR. 3) Una tercera alternativa incluyó dos presas, una nueva en el río Tecate y la presa Abelardo L. Rodríguez (BDAN et al., 2015). Se concluyó que la tercera alternativa resulta atractiva porque incorpora una nueva presa que, según un análisis hidrológico preliminar, captaría alrededor de 400 l/s. Las primeras dos opciones requerirían de negociaciones con Estados Unidos para el retorno de aguas tratadas y obras de conducción que se alojarían dentro de las vialidades laterales a la canalización del río Tijuana.

Otra alternativa cuya factibilidad se requiere evaluar es la utilización de aguas tratadas para la recarga de acuíferos mediante la construcción de un sistema de infiltración en Valle de Las Palmas. Recientemente también se ha contemplado el bombeo de aguas residuales tratadas de las PTAR Arturo Herrera y La Morita al Valle de Guadalupe. La reutilización de las aguas tratadas de esas plantas reduciría el volumen descargado al río y la carga de bombeo de la PB-CILA para el “alejamiento” (H. Durán, comunicación personal, 9 de junio de 2022). Se estima una demanda potencial de 2 400 l/s en riego agrícola para los valles de Guadalupe y Las Palmas, para servicios público-urbanos 480 l/s y para uso industrial, comercial y de servicios de 58 l/s (RL Construcciones y Proyectos, 2017). Sin embargo, la distancia aproximada a Valle de Guadalupe es de 94 kilómetros, consiguientemente esta opción implica bombeo con altos costos de energía e impactos ambientales.

Una estrategia de sectorización en el saneamiento de aguas residuales, a partir de las 27 microcuencas definidas en la zona urbana de Tijuana, podría ampliar las posibilidades de reutilización con mayor efecto en la sustitución de agua de primer uso y ser menos vulnerable a impactos, por ejemplo, de cambio climático. Esta estrategia puede implementarse, en al menos dos formas: 1) si se adopta el manejo y tratamiento sectorizado de aguas residuales; o, 2) si se agregan módulos de tratamiento avanzado o pulimento para ciertos volúmenes de las PTAR en zonas estratégicas (H. Durán, comunicación personal, 9 de junio de 2022; Stip et al., 2019).

Problemática de saneamiento en Nogales, Sonora

Nogales, Sonora, forma con Nogales, Arizona, una zona urbana transfronteriza que se conoce como Ambos Nogales (véase Figura 3). En 2020, la población en la Nogales mexicana era de 264 782 habitantes, con un crecimiento en el periodo 2010-2020 de 20.2%. Debido a las características topográficas de esta zona fronteriza, con pendientes altas hacia Arizona, las aguas fluyen por gravedad al lado estadounidense y este fenómeno se ha registrado como un problema añejo (Acta CILA 206, 1958).

La problemática en materia de saneamiento que presenta la ciudad de Nogales, Sonora, se debe a que gran parte de la infraestructura sanitaria ha alcanzado su vida útil con tuberías que tienen una antigüedad de 30 y hasta 50 años (CILA, 2021c). En

toda la ciudad el drenaje sanitario presenta altos niveles de infiltración de agua pluvial y arena, pues la infraestructura pluvial en la ciudad es muy escasa. Esto afecta el funcionamiento de los equipos de bombeo y la vida útil de los emisores.

La infraestructura para atender la problemática de saneamiento en Nogales incluye cinco plantas, la principal es la PITAR Río Rico construida en 1972 en Arizona, y la segunda en importancia la PTAR Los Alisos, construida en 2012, con una capacidad de 220 l/s que descarga al río Bambuto, aunque se estima que en 2019 operó con un caudal promedio de 179.29 l/s.

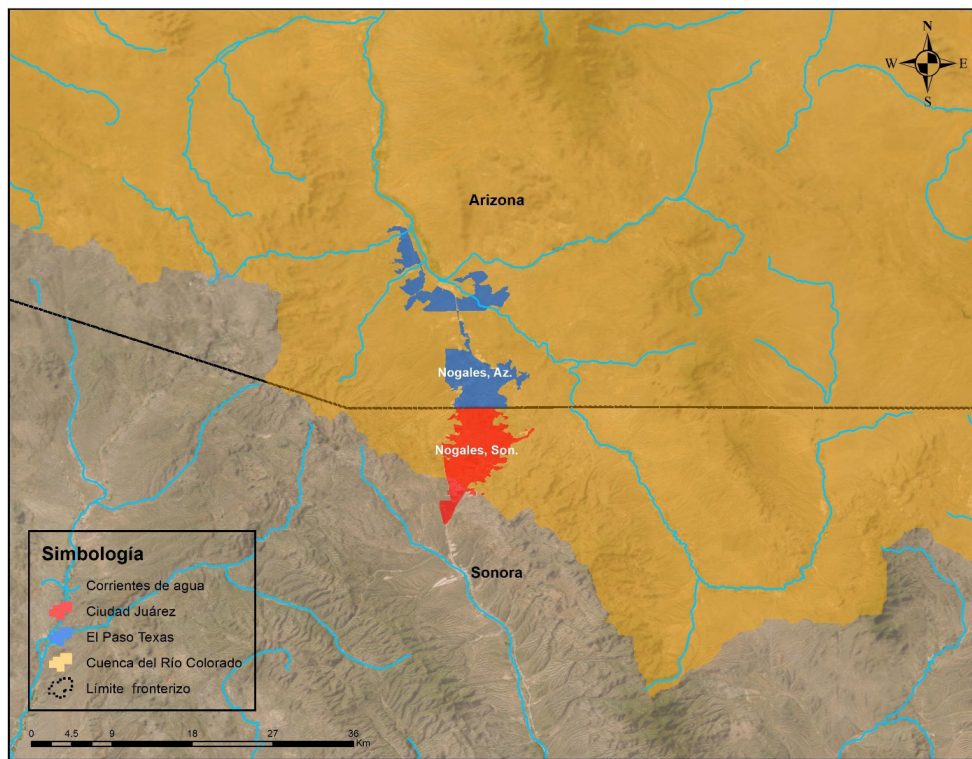
Los desarrolladores han construido tres PTAR que han sido entregadas al Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Nogales para su operación: Puerta de Anza, Lomas del Sol y La Mesa, esta última se encuentra fuera de operación. En 1988 mediante el acta CILA 276 se acordó por los gobiernos de México y Estados Unidos que un caudal de 434 l/s será tratado en la PITAR. Esta PITAR fue ampliada en 2000 y en ese mismo año se renovó el sistema de recolección. Otras PTAR de menor capacidad son Lomas del Sol y Puerta de Anza, ambas en el sector oriente de la ciudad. En 2004 se rehabilitó el sistema de alcantarillado.

Aunque la PTAR Los Alisos dispone de cinco equipos de bombeo generalmente opera con uno solo de estos equipos, pues cuatro de ellos no funcionan debido a una mala operación. Esto conduce a exceder el volumen de tratamiento asignado a México en la PITAR Río Rico. La CILA cubre los costos de tratamiento del volumen convenido con base en los costos que tendría al hacerlo en su territorio. Adicionalmente, el Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Nogales debe cubrir el costo del tratamiento real por el volumen que exceda el caudal convenido. En 2019 la PITAR trató 573 l/s, lo que sobrepasó en 139 l/s el volumen acordado.

En 2020 se realizaron proyectos de ampliación del sistema de saneamiento a las colonias del suroeste de la ciudad de Nogales. En 2021 se acordó, mediante la firma del Acta 326, rehabilitar el colector internacional ante diversas fallas en su funcionamiento. Establecer mecanismos que aseguren una operación eficaz y un mantenimiento continuo de la infraestructura binacional existente es también un asunto importante que se debe atender (C. Gil, comunicación personal, 15 de junio de 2022).

En el informe específico del EGV para Nogales se proponen proyectos de infraestructura convencionales. Los proyectos principales son: la ampliación de la capacidad conjunta de la PTAR Los Alisos de 240 l/s a una capacidad de 440 l/s y la sustitución de aproximadamente 5.8 km de atarjeas y colectores deteriorados en la zona centro de la ciudad, así como la rehabilitación en varias colonias. Otros proyectos contemplados son: la rehabilitación de los pozos de visita del emisor Los Alisos; la rehabilitación y ampliación de 30 l/s a 70 l/s de la planta de La Mesa y adicionalmente realizar la ampliación de la planta de tratamiento Puerta de Anza de 45 l/s a 60 l/s (CILA, 2021c). El presupuesto estimado para los proyectos identificados es de 1 740 millones de pesos (CILA, 2021a).

Figura 3. Nogales, Sonora-Nogales, Arizona



Fuente: elaboración propia

Potenciales estrategias de EC en el sistema de saneamiento de Nogales, Sonora

Un primer punto importante es notar que las posibilidades de reciclado de aguas en Nogales, Sonora, son limitadas debido principalmente a que hasta 90% de las aguas residuales se trata en la PTAR Río Rico. No obstante, en el informe específico para Nogales del EGV se plantea que existe un potencial para la reutilización de casi 24 millones de metros cúbicos de aguas tratadas en la PTAR Los Alisos, con una línea morada hacia zona industrial, nuevas zonas de crecimiento para riego de parques y jardines, lavado de autos, etcétera.

Otra posibilidad consiste en derivar aguas residuales tratadas de las PTAR Lomas del Sol y Puerta de Anza, ambas en el sector oriente de la ciudad, que pudieran dotar de agua para diversos usos en parques, camellones, áreas comerciales y deportivas, hasta llegar a dos zonas industriales. Para ello se requiere construir una línea morada de 12.1 km. (CILA, 2021c). En 2022 se implementó un proyecto con apoyo de la EPA y el BDAN para identificar los usos potenciales de agua industrial tratada para Nogales (C. Gil, comunicación personal, 15 de junio de 2022).

Existe también una iniciativa para un corredor binacional de infraestructura verde para la captación de agua para recarga de los acuíferos y mitigar el impacto de las aguas pluviales (Giner et al., 2019; Schwartz et al., 2023). Específicamente se ha

fomentado la creación de *jardines de lluvia*, estos consisten en depresiones con vegetación nativa para reducir la escorrentía y al mismo tiempo filtrar el agua de la lluvia y contribuir así a la recarga del acuífero. Sin embargo, este proyecto no se encuentra integrado a los planes de saneamiento que maneja CILA (EGV) ni la Conagua (PESFN). Estas propuestas podrían integrarse en un plan maestro de manejo de aguas pluviales y aguas tratadas.

Un problema financiero que enfrenta la ciudad de Nogales, Sonora, es el alto costo por consumo de energía eléctrica por concepto de bombeo de aguas residuales crudas. Sin embargo, no se contemplan alternativas de generación de energía, que utilicen, por ejemplo, celdas fotovoltaicas, para el bombeo de aguas en sitios donde el porteo sea factible.

Paradójicamente, los principales beneficios ambientales del saneamiento en Nogales, Sonora, se reciben en localidades aguas abajo, al norte del río Rico, principalmente en las comunidades de Tumacacori y Tubac. Las aguas tratadas en la PITAR Río Rico se descargan en el río Santa Cruz. El río Santa Cruz conduce, a partir del lugar de descarga de aguas tratadas, un volumen de agua estimado entre 500 l/s y 950 l/s del cual 90% es agua que proviene de México (García Ochoa et al., 2023).

Es importante considerar que las aguas tratadas en la PITAR de río Rico siguen siendo de propiedad mexicana por lo que se podría planear su reutilización del lado mexicano (J. Marruffo, comunicación personal, 15 de junio de 2022). Sin embargo, esto requeriría no solo de infraestructura para su conducción y bombeo al lado mexicano, sino también de una negociación binacional y un adecuado marco regulatorio que garantice la salud pública y la calidad de las aguas, pero que permita la viabilidad de reutilizar las aguas tratadas en reúsos indirectos sea agrícola, urbano, industrial y ambiental, como en la recarga artificial de acuíferos.

Problemática de saneamiento en Nuevo Laredo, Tamaulipas

Las ciudades de Nuevo Laredo, Tamaulipas, y Laredo, Texas, conocidas también como los dos Laredos, se ubican dentro de la cuenca del río Bravo/Grande (véase Figura 4). En 2020, la población en Nuevo Laredo era de 425 058 habitantes. En comparación con 2010, la población creció 10.7%. El sistema de saneamiento de Nuevo Laredo tiene capacidad para tratar 1 617 l/s de agua residual en cinco PTAR con las que cuenta.

La red de alcantarillado fue construida en el periodo 1900-1920 y consta de aproximadamente 781 km de tuberías. Las tuberías de concreto (77.3%) ya cumplieron con su vida útil, estimada de 15 a 30 años, principalmente en el centro de la ciudad, lo cual ocasiona hundimientos de terreno comúnmente llamados “caídos” (CILA, 2021d).

En 1989 se inició un proyecto de saneamiento con seis componentes principales: un conector ribereño, el conector Coyotes, la rehabilitación y ampliación de la red, una planta de bombeo y una planta de tratamiento. Este proyecto se concluyó en 1996 con un costo de 60 millones de dólares. Aunque no se pudo desconectar el sistema sanitario del pluvial, las descargas al río Bravo se redujeron de 1 100 l/s a 160 l/s (D. Negrete, comunicación personal, 7 de junio de 2022).

La PITAR Nuevo Laredo es la planta con mayor capacidad, con una capacidad instalada de 1 360 l/s mediante un sistema de tratamiento secundario, comenzó su funcionamiento en 1996 y se considera que para 2036 cubrirá su vida útil (D. Negrete, comunicación personal, 7 de junio de 2022).

La calidad del efluente de la PITAR cumple con los parámetros obligatorios establecidos por la CILA debido a que se descarga en la zona de inundación del río Bravo, un cuerpo de agua internacional. Trabaja alrededor de 70% (950 l/s) de su capacidad, generando en promedio 10 toneladas de lodos al día.

Una desventaja de la forma de manejo actual de los lodos en la PITAR es el espacio insuficiente, tanto en los lechos de secado, como en el espacio de almacenamiento dentro de la PITAR antes de la disposición final en el relleno sanitario; así como los potenciales impactos ambientales que tienen debido a que se consideran desechos. El manejo de los lodos en la PITAR representa el mayor problema operativo y económico de la planta debido a la saturación del espacio de secado y almacenamiento y la necesidad de transportarlos para su disposición final en rellenos sanitarios con los consecuentes gastos de transporte.

La PTAR Norponiente descarga su efluente, con una calidad que cumple con las condiciones para contacto con personas, al arroyo El Coyote, donde forma un pequeño remanso nombrado El Laguito, que es aprovechado para recreación (CILA, 2021d).

Nuevo Laredo tiene responsabilidades de saneamiento establecidas en dos actas de la CILA, la primera fue firmada en 1989, el Acta 279 “Medidas conjuntas para mejorar la calidad de las aguas del río Bravo en Nuevo Laredo Tamaulipas-Laredo Texas”. En 1997 se firmó el Acta 297 “Programa de operación y mantenimiento y la distribución de sus costos, del proyecto internacional para mejorar la calidad de las aguas del río Bravo en Nuevo Laredo, Tamaulipas / Laredo, Texas”.

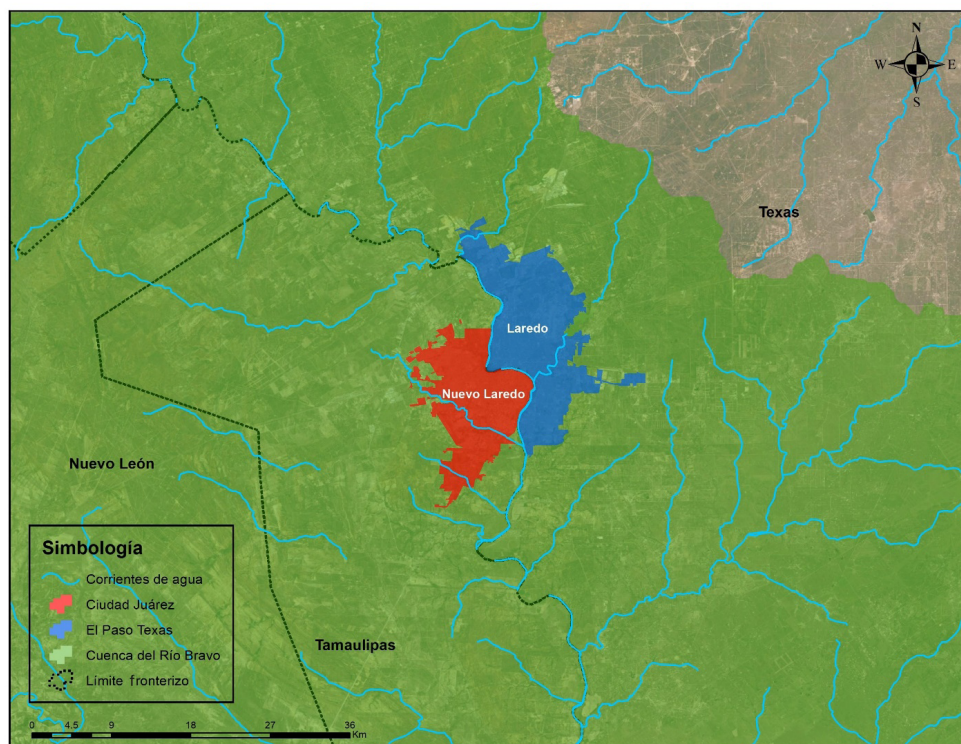
En 2013 se estimaba que al menos 19 millones de litros de aguas residuales de Nuevo Laredo eran descargadas en el río Bravo/Grande (Satija, 2013). Para 2023 se estimaban descargas de 47 millones de litros de aguas sin tratar por día al río Bravo; en 2023 las descargas se presentan tanto en el sistema sanitario como en el pluvial (D. Negrete, comunicación personal, 7 de junio de 2022).

En esencia, para atender la problemática de saneamiento en Nuevo Laredo el EGV propone un programa similar al de 1996: rehabilitar el colector ribereño, rehabilitar el colector Coyotes, incrementar el diámetro, ampliación de la red de algunas colonias que no tienen drenaje y la rehabilitación, que es el punto medular de la parte centro de la ciudad, de caídos, hundimientos y colapsos.

En junio de 2023, uno de los proyectos principales es la ampliación de la capacidad de la PTAR Norponiente de (200 l/s), hasta su capacidad total de diseño que es de 600 l/s. Aproximadamente 25% de los egresos totales del saneamiento corresponden a gastos por energía eléctrica, en este tema el EGV propone una reingeniería de las estaciones de bombeo y la adquisición de plantas de emergencia en instalaciones prioritarias ante una eventual falta de energía eléctrica.

Con respecto al manejo de lodos, el EGV menciona que existe la intención de desarrollar un proyecto de composta a gran escala, para aprovechar las 10 toneladas de lodo y producir más de 10 toneladas de fertilizante orgánico al día. Sin embargo, en las acciones identificadas no se incluye este proyecto, solo presupuesto para la disposición externa de lodos.

Figura 4. Nuevo Laredo, Tamaulipas-Laredo, Texas



Fuente: elaboración propia

Potenciales estrategias de EC en el sistema de saneamiento de Laredo, Tamaulipas

En Nuevo Laredo solo 6% del agua tratada en la PITAR, en total más de 2 300 000 m³, se recicla (CILA, 2021a). Las aguas tratadas se utilizan para el enfriamiento de los equipos electromecánicos de la misma PITAR, también, y mediante una línea de agua tratada, se riegan algunas áreas verdes municipales como el parque Viveros y el camellón del Paseo Colón. Las aguas tratadas de la PTAR Las Torres se utiliza para riego de los parques Silao, bulevar Las Torres y Las Palapas.

Para ampliar el reciclado de aguas, el EGV propone la realización de un estudio y proyecto ejecutivo de reutilización. Algunas opciones de reciclado a futuro son: en el sector agrícola, para la compactación de tierras para el desarrollo urbano, la entrega de aguas residuales a los industriales de Nuevo Laredo y municipios circunvecinos, que no requieren de agua de primer uso para sus procesos, lo que liberaría las aguas de primer uso que se destinan a tal actividad.

En Nuevo Laredo no se han implementado formas de infraestructura verde en alguna PTAR, como humedales construidos asociados con el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, dada la buena calidad de los lodos producidos por la PITAR, se ha iniciado con el composteo a pequeña escala como opción de reciclado de nutrientes

para producir fertilizante. Se podrían considerar, además de composta a gran escala, proyectos de plantas generadoras de electricidad que utilicen algún porcentaje de los lodos, para reducir el volumen de estos y también el costo de la electricidad (Aguilar-Benitez & Blanco, 2018).

Para un posible proceso de descentralización del saneamiento en Nuevo Laredo, la ciudad puede sectorizarse en cinco cuencas de drenaje principales: Puente III, Alazanas, Coyote, Ribereño y Las Ánimas. Estas áreas de drenaje representan áreas que son distinguibles geográficamente y en las que podrían implementarse sistemas descentralizados de tratamiento.

Un proyecto importante que se planea construir en la zona de inundación del río Bravo es el Parque Binacional Dos Laredos, “parques espejo” en ambos lados de la frontera, con una extensión total de diez kilómetros. Este proyecto, presentado en febrero de 2022, es una iniciativa de los alcaldes de Laredo y Nuevo Laredo y la Cámara de Comercio, y fue apoyado por el embajador de Estados Unidos, también lo promueve el Río Grande International Studies Center (Creciendo con Nuestro México, 2022).

Este proyecto se inspira en el River Walk de San Antonio e incluye parques, equipamientos deportivos y culturales y santuarios (D. Negrete, comunicación personal, 7 de junio de 2022; Oliveras González, 2024). Para este proyecto se requiere la restauración del río, la rehabilitación de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial, para poder eliminar las descargas de aguas sin tratar, y la eliminación de vegetación invasora y altamente consumidora de agua, se utilizarían aguas tratadas para el riego de áreas verdes.

Conclusiones

Las continuas inversiones binacionales en infraestructura convencional de saneamiento, desde la década de 1970, han logrado una cobertura casi completa de conexión de viviendas al sistema de drenaje sanitario en las ciudades fronterizas del norte de México. Sin embargo, el deterioro de los sistemas de saneamiento por el término de su vida útil, su inadecuado mantenimiento u operación derivan en volúmenes de agua sin tratar y derrames de aguas residuales tratadas y sin tratar que cruzan la frontera México-Estados Unidos.

En general, los programas de saneamiento se orientan a inversiones cada vez mayores para tratar de cubrir las fallas de los sistemas de saneamiento por su deterioro natural, deficiente operación y mantenimiento o para cubrir las nuevas necesidades derivadas de un fuerte y continuo crecimiento de población. Este tipo de planeación prioriza la renovación, rehabilitación y ampliación de infraestructura convencional.

Un aspecto clave es que ese enfoque de planeación, bajo un contexto que implica compromisos ambientales con potenciales sanciones por el capítulo ambiental del T-MEC y posibilidades de financiamiento de infraestructura ambiental con alcances amplios, no se ha ajustado hacia nuevos enfoques como la EC y formas de infraestructura verde.

En este trabajo se muestra que los programas EGV y PESFN priorizan infraestructura convencional e incorporan de manera insuficiente estrategias de EC o formas de infraestructura verde a pesar de planteamientos hechos por el BDAN de financiar

infraestructura para enfrentar el cambio climático y promover una economía verde, y la propuesta en el PAF 2025 de que 100% de los proyectos del Fondo de Infraestructura Ambiental Fronteriza incluyan una evaluación de las oportunidades de reciclado del agua.

Desafortunadamente el enfoque convencional ha sido insuficiente para resolver las problemáticas transfronterizas de saneamiento que se han mantenido durante varios lustros, como se observó en los tres casos revisados y en mayor grado en Tijuana, con persistentes fugas y derrames de aguas residuales que cruzan la frontera.

Aunque los sistemas de saneamiento seguirán dependiendo en gran medida de la infraestructura convencional, dado que es inviable reemplazarla por completo, es necesario identificar un equilibrio factible entre un enfoque basado en infraestructura convencional y estrategias de EC, incluida infraestructura verde. Para lograr una mayor sustentabilidad y resiliencia en los sistemas de saneamiento se identificaron varios aspectos importantes a tomar en cuenta:

1) La posibilidad de reconsiderar la escala y grado de centralidad de estos sistemas (por ejemplo, grandes plantas que concentran el tratamiento en las periferias o fuera de las ciudades) por un sistema sectorizado (tomando en cuenta las microcuencas en una ciudad). Un sistema sectorizado puede ofrecer mejores posibilidades para la resiliencia ante fenómenos como el cambio climático.

2) La necesidad de suficiente capacidad operativa y financiera local para una adecuada operación y un constante mantenimiento de la infraestructura (nueva o rehabilitada) que sea resiliente ante los cambios.

Se requiere también de elaborar planes maestros en cada ciudad para el manejo integrado de aguas pluviales y aguas tratadas que incluya infraestructura verde para favorecer la filtración y recarga de acuíferos. Los proyectos binacionales transfronterizos con enfoque ambiental, por ejemplo, la red de infraestructura verde en Ambos Nogales y el Parque Binacional Dos Laredos, deberían integrarse a los planes maestros pues son interdependientes con un drenaje pluvial y sanitario integral, y dependen de un saneamiento efectivo de las aguas residuales.

En particular, la propuesta de la red de infraestructura verde de Ambos Nogales ofrece un modelo para fusionar soluciones de EC en la restauración de servicios ecosistémicos con un enfoque de planeación estratégico y binacional (Lara-Valencia et al., 2022). Un enfoque integrado también requiere que las dependencias encargadas de agua y saneamiento y las de medio ambiente a nivel municipal y estatal se articulen y establezcan programas que consideren los diferentes aspectos en los que el manejo de agua y saneamiento afectan o benefician al ambiente de las ciudades fronterizas.

En la planeación urbana es necesario contemplar que los nuevos desarrollos habitacionales, que cumplan con una escala adecuada, incluyan estrategias de EC para aprovechar el agua mediante la retención, tratamiento, reutilización y reciclado del agua que se le suministre por los sistemas municipales y el ambiente (captura de agua de lluvia, jardines de lluvia, tratamiento descentralizado, entre otras estrategias). Para ello sería necesario adecuar las normatividades locales e identificar y, probablemente, promover incentivos económicos.

Como la revisión de literatura sugiere, la transición hacia una economía circular en el sector del saneamiento requiere marcos de gobernanza que promuevan esfuerzos colaborativos entre los gobiernos, sector privado y la sociedad civil (Ddiba et al., 2020). Es necesario reconocer que, dado el carácter binacional de la problemática de saneamiento fronterizo tratada en este trabajo, se requiere de otros análisis que incorporen

aspectos como las estructuras de gestión y los cambios necesarios para incorporar los principios de los enfoques de EC e infraestructura verde en la planeación del saneamiento, su financiamiento, normatividad e implementación.

Referencias

- Aguilar-Benitez, I. & Blanco, P. A. (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 86-114. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1672>
- Allen, L. (2020). Cleaning up the United States-Mexico border: North American Development Bank's efforts to close the wastewater infrastructure gap. *Electronic Green Journal*, 1(44). <https://doi.org/10.5070/G314448233>
- Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN). (2021, 3 de diciembre). *Supporting a healthy environment & green growth in the U.S.-Mexico border region. Expanded project eligibility*. https://www.nadb.org/uploads/files/expanded_project_eligibility.pdf
- Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), Comisión Nacional del Agua (Conagua) & Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT). (2015, 22 de septiembre). *Identificación de alternativas de tratamiento y disposición final de las aguas residuales y evaluación del uso del agua subterránea del acuífero de Tijuana*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/presentacion_reuso_tijuana.pdf
- Castellet-Viciano, L., Hernández-Chover, V. & Hernández-Sancho, F. (2022). The benefits of circular economy strategies in urban water facilities. *Science of the Total Environment*, 844, Artículo 157172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157172>
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). (2021a). *Formulación del Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión* (CILA-JUA-LPN-6-2020. Informe final). Comisión Internacional de Límites y Agua / FG y asociados. http://www.cila.gob.mx/syca/SUIF/PSFN_IF00_General_00_Informe.pdf
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). (2021b). *Formulación del Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión* (CILA-JUA-LPN-6-2020. Tijuana, Baja California. Informe especial). Comisión Internacional de Límites y Agua / FG y asociados. http://www.cila.gob.mx/syca/SUIF/PSFN_IF01_Tijuana_A_Informe.pdf
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). (2021c). *Formulación del Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión* (CILA-JUA-LPN-6-2020, Nogales, Sonora. Informe especial). Comisión Internacional de Límites y Agua / FG y asociados. http://www.cila.gob.mx/syca/SUIF/PSFN_IF05_Nogales_A_Informe.pdf
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). (2021d, agosto). *Formulación del Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión* (CILA-JUA-LPN-6-2020, Nuevo Laredo, Tamaulipas. Informe especial). Comisión Internacional de Límites y Agua / FG y asociados. http://www.cila.gob.mx/syca/SUIF/PSFN_IF12_NLaredo_A_Informe.pdf
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). (2024, 12 de marzo). *Programa de saneamiento de la frontera norte a nivel gran visión: un instrumento de México para el cumplimiento de las normas de saneamiento y sus compromisos binacionales*.

- Comisión Internacional de Límites y Agua / FG y asociados. Recuperado el 22 de abril de 2024, de <https://cila.sre.gob.mx/cilanorte/index.php/boletin/114-saneamiento-calidadagua>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021a). *Programa hídrico regional 2021-2024. Región hidrológico-administrativa I península de Baja California*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Gobierno de México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_I_Pen%C3%ADnsula_de_Baja_California.pdf
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021b). *Programa hídrico regional 2021-2024. Región hidrológico-administrativa II noroeste*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Gobierno de México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_II_Noroeste.pdf
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021c). *Programa hídrico regional 2021-2024. Región hidrológico-administrativa VI río Bravo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Gobierno de México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_VI_R_o_Bravo_.pdf
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2023). México y Estados Unidos refrendan su compromiso con el programa integral saneamiento de Tijuana-San Diego. Comunicado conjunto México-Estados Unidos. *Somos Conagua*, (104), 8-9. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/851027/Somos_Conagua_16-08-2023.pdf
- Creciendo con Nuestro México. (2022, 23 de marzo). *Así será el parque fluvial binacional de Nuevo Laredo y Laredo* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/ZDYRgSVEUuA>
- Consejo Nacional de Población (Conapo). (2021, 4 de octubre). Índices de *marginación 2020*. Recuperado el 15 de enero de 2024, de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- Daigger, G. T. (2009). Evolving urban water and residuals management paradigms: water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery. *Water Environment Research*, 81(8), 809-823. <https://doi.org/10.2175/106143009x425898>
- Ddiba, D., Andersson, K., Koop, S. H. A., Ekener, E., Finnveden, G. & Dickin, S. (2020). Governing the circular economy: assessing the capacity to implement resource-oriented sanitation and waste management systems in low- and middle-income countries. *Earth System Governance*, 4, Artículo 100063. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2020.100063>
- Dougherty, J. (2018, 29 de marzo). *U.S.-Mexico commission fails to stop sewage plaguing border*. The Revelator. <https://therevelator.org/sewage-plaguing-border/>
- Elmer, M. (2021, 26 de abril). *Environment report: Tijuana and San Diego share a sewage problem but not a solution*. Voice of San Diego. <https://voiceofsandiego.org/2021/04/26/environment-report-tijuana-and-san-diego-share-a-sewage-problem-but-not-a-solution/>
- Elmer, M. & Calderon, V. (2021, 20 de abril). *Two sources of U.S.-Mexico sewage flows are fighting for one pot of money*. Voice of San Diego. <https://voiceofsandiego.org/2021/04/20/two-sources-of-u-s-mexico-sewage-flows-are-fighting-for-one-pot-of-money>
- Fielding, K. S., Dolnicar, S. & Schultz, T. (2019). Public acceptance of recycled water. *International Journal of Water Resources Development*, 35(4), 551-586. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1419125>

- Frijns, J., Smith, H. M. & Makropoulos, C. (2024). Enabling the uptake of circular water solutions. *Water Policy*, 26(1), 94-110. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.167>
- Furness, M., Bello-Mendoza, R. & Chamy Maggi, R. (2023). The biofactory: quantifying life cycle sustainability impacts of the wastewater circular economy in Chile. *Sustainability*, 15(22), Artículo 16077. <https://doi.org/10.3390/su152216077>
- García Ochoa, R., Zuniga-Teran, A., Cervera Gómez, L. E., Scott, C. A., Peña, S., Balarezo Vasquez, T., Buechler, S., Muñan Valencia, J. A. & Martínez-Molina, K. G. (2023). Evaluación del proyecto de saneamiento transfronterizo en Ambos Nogales. Identificación de lo homogéneo y lo diverso. *Estudios Fronterizos*, 24, Artículo e122. <https://doi.org/10.21670/ref.2311122>
- Geisendorf, S. & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771-782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Ghimire, U., Sarpong, G. & Gude, V. G. (2021). Transitioning wastewater treatment plants toward circular economy and energy sustainability. *Acs Omega*, 6(18), 11794-11803. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05827>
- Giner, M.-E., Córdova, A., Vázquez-Gálvez, F. A. & Marruffo, J. (2019). Promoting green infrastructure in Mexico's northern border: the Border Environment Cooperation Commission's experience and lessons learned. *Journal of Environmental Management*, 248, Artículo 109104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.005>
- Giner, M.-E., Tellez-Cañas, S. & Giner, C. L. (2022). *Assessing impact of water and wastewater infrastructure along the Texas-Mexico border: Did we make a difference on contagious diseases?* SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4098512>
- Giner, M. E., Vazquez, F. A., Vazquez, M., Balarezo, T. & Cordova, A. (2017). *The evaluation of the impact of basic sanitation infrastructure at the U.S.-Mexico border*. International Water Resources Association Proceedings. https://iwra.org/proceedings/index.php?page=286&eventid=6&abstract_id=4126
- Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D. N. & Rodríguez-Chueca, J. (2020). Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: challenges and opportunities. *Water*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051431>
- Hargrove, W. L., Del Rio, M. & Korc, M. (2018). Water matters: water insecurity and inadequate sanitation in the U.S./Mexico border region. *Environmental Justice*, 11(6), 222-227. <https://doi.org/10.1089/env.2018.0022>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s. f.). Sistema para la consulta de información censal (SCINCE) 2020. Recuperado el 24 de enero de 2024, de <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- International Boundary and Water Commission. (1995, 24 de noviembre). *Facilities planning program for the solution of border sanitation problems* (Minute 294). <https://www.ibwc.gov/wp-content/uploads/2023/05/Min294.pdf>
- Kakwani, N. S. & Kalbar, P. P. (2020). Review of circular economy in urban water sector. Challenges and opportunities in India. *Journal of Environmental Management*, 271, Artículo 111010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111010>
- Korhonen, J., Honkasalo, A. & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

- KSDY50 San Diego. (2023, 17 de febrero). *Derrame de aguas negras en Tijuana cruza a San Diego* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/JPA07Qs162w>
- Kundu, D., Dutta, D., Samanta, P., Dey, S., Sherpa, K. C., Kumar, S. & Dubey, B. K. (2022, 20 de noviembre). Valorization of wastewater: a paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. *Science of the Total Environment*, 848, Artículo 157709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157709>
- Lara-Valencia, F, Garcia, M, Norman, L. M., Anides Morales, A. & Castellanos-Rubio, E. E. (2022). Integrating urban planning and water management through green infrastructure in the United States-Mexico border. *Frontiers in Water*, 4, Artículo 782922. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.782922>
- Leija McDonald, P., Aguilar Benítez, I. & Nolasco, D. A. (2022). El saneamiento como componente clave en el ciclo urbano del agua: el caso de Reynosa, Tamaulipas. En I. Aguilar Benítez & J. Domínguez Serrano (Coords.), *Sustentabilidad, innovación tecnológica y gobernanza del agua en cuencas y ciudades* (pp. 145-172). Tirant lo Blanch.
- Masi, F., Rizzo, A. & Regelsberger, M. (2018). The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of Environmental Management*, 216, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.086>
- McKenna, P., Banwart, S., Evans, B., Zakaria, F. & Guest, J. (2022). *Will the circle be unbroken? the climate mitigation and sustainable development given by a circular economy of carbon, nitrogen, phosphorus and water*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2256164/v1>
- Morseletto, P., Mooren, C. E. & Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2(4), 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Moya, B., Sakrabani, R. & Parker, A. (2019). Realizing the circular economy for sanitation: assessing enabling conditions and barriers to the commercialization of human excreta derived fertilizer in Haiti and Kenya. *Sustainability*, 11(11), Artículo 3154. <https://doi.org/10.3390/su11113154>
- Mumme, S. (2021). *Managing water on the U.S.-Mexico border: the binational challenge*. Center for the United States and México-Rice University's Baker Institute for Public Policy. <https://doi.org/10.25613/DVQ9-AH15>
- Novotny, V. (2011). Holistic approach for distributed water and energy management in the cities of the future. *Proceedings Cities of the Future Conference, IWA*.
- Oliveras González, X. (2024). La combinación de la refrontierización y la desfronterización en la configuración territorial. Un acercamiento desde la teoría de campos. *Estudios Fronterizos*, 25, Artículo e142. <https://doi.org/10.21670/ref.2406142>
- Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Las aguas residuales: El recurso desaprovechado*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_spa
- Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494>

- Rani, A., Snyder, S., Kim, H., Lei, Z. & Pan, S. (2022). Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies. *NPJ Clean Water*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00197-8>
- RL Construcciones y Proyectos. (2017). *Plan integral de saneamiento y reúso del agua en Tijuana y Playas de Rosarito, en el estado de Baja California* (Contrato Núm. Ptar-CESPT-2017-001-SROP LP). Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana-Gobierno del Estado de Baja California. https://www.cespt.gob.mx/Documentos/Transparencia/Art_81/81_41/41_03_2018_ResumenEstudioSaneamiento.pdf
- Rozin, P., Haddad, B., Nemeroff, C. & Slovic, P. (2015). Psychological aspects of the rejection of recycled water: contamination, purification and disgust. *Judgment and Decision Making*, 10(1), 50-63. <https://doi.org/10.1017/S193029750000317X>
- Satija, N. (2013, 23 de octubre). *U.S. and Mexico struggle to clean up Rio Grande*. The Texas Tribune. https://www.texastribune.org/2013/10/23/us-and-mexico-struggle-clean-rio-grande/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIwOqq0K65iQMVv2BHAR10nxx8EAAAYASAAEgKzqvD_BwE
- Schwartz, P., Zuniga-Teran, A. A., Lara-Valencia, F., García-Pérez, H., Díaz Montemayor, G., Gil Anaya, C., Marruffo, J., Rodriguez Ponce, O. A. & Holtzman, Z. (2023). Pathways to greening border cities: a policy analysis for green infrastructure in Ambos Nogales. *Land*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/land12040781>
- Secretaría de Relaciones Exteriores. (2023, 7 de agosto). *México y Estados Unidos refrendan su compromiso en la implementación del Programa Integral Saneamiento de Tijuana, B.C.-San Diego, CA*. [Comunicado]. <https://cila.sre.gob.mx/cilanorte/index.php/prensa/184-prensa151>
- Smol, M., Adam, C. & Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(3), 682-697. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Stip, C. M., Mao, Z., Bonzanigo, L., Browder, G. J. & Tracy, J. (2019). *Water infrastructure resilience—examples of dams, wastewater treatment plants, and water supply and sanitation systems (English)*. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/960111560794042138/Water-Infrastructure-Resilience-Examples-of-Dams-Wastewater-Treatment-Plants-and-Water-Supply-and-Sanitation-Systems>

Ismael Aguilar Benitez

Mexicano. Doctorado en planeación urbana y regional por la Universidad de California, Irvine (2007). Investigador titular C en El Colegio de la Frontera Norte (El Colef). Líneas de investigación: gestión del agua y los servicios de agua potable y saneamiento, economía ambiental y ecológica del agua, política pública hídrica. Publicación reciente: Aguilar-Benitez, I. (2023). Factores en la decisión de beber agua directamente de la red pública en tres zonas metropolitanas de México. *Revista EURE-Revista de Estudios Urbano Regionales*, 50(149). <https://doi.org/10.7764/EURE.50.149.07>