

13. Economía circular y reciclaje del agua en viviendas de Pachuca, Hidalgo*



SERGIO GABRIEL CEBALLOS PÉREZ¹

GABRIELA ALEJANDRA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ²

ALFREDO BIGURRA ALZATI³

LILIANA LIZÁRRAGA MENDIOLA⁴

MIGUEL ÁNGEL TORRES GONZÁLEZ⁵

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.13>

Resumen

Es un hecho que la escasez de agua está aumentando día con día; el crecimiento poblacional, la producción masiva, el consumo desmedido, y los efectos del cambio climático han incrementado la presión sobre este recurso vital. En 2021 la ONU-Hábitat publicó que el consumo promedio per cápita en México es de 366 litros al día, sin contar el agua virtual proveniente de los productos que consumimos, mientras que el consumo promedio en países desarrollados como Estados Unidos alcanza los 575 litros al día. Aun así, el consumo promedio de agua de los mexicanos se encuentra arriba del consumo recomendado que es de 96 litros al día. Los hogares son

* Este capítulo se desarrolló en el marco de colaboración entre Cuerpos Académicos de la Red de Infraestructura Verde y Urbanismo Sustentable. No se contó con ningún financiamiento público para ello, ni se tiene ningún conflicto de interés entre los participantes.

¹ Doctor en Economía. Investigador por la Universidad Politécnica de Pachuca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4991-3540>

² Doctora en Microbiología-Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8351-8451>

³ Doctor en Arquitectura. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9740-9483>

⁴ Doctora en Ciencias de la Tierra. Profesora-investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6320-8923>

⁵ Doctor en Planeación Estratégica y Gestión de la Tecnología. Profesor-investigador de tiempo completo de la Universidad Politécnica de Pachuca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-6610>

uno de los espacios donde el agua es un recurso vital y donde la economía circular puede contribuir a un mejor uso y diseño de nuevas formas de reutilización y reciclaje del agua mediante la filtración, separación, biodigestión, entre otros procesos combinados, con el fin de darle un tratamiento para construir un modelo de economía circular del agua a nivel de vivienda. Este capítulo tiene como objetivo analizar la posibilidad de reciclar agua a nivel doméstico y tener una aproximación de la proporción de agua que se puede ahorrar mediante economía circular.

Palabras clave: *reciclaje de agua, hogares, economía circular, infraestructura verde.*

Introducción

Uno de los principales desafíos socioambientales del siglo actual es la crisis hídrica, la cual se agudiza entre otras cosas, por el crecimiento demográfico, el cambio climático, la pobre cultura sobre el cuidado del agua y el manejo ineficiente del recurso. Alrededor de dos mil millones de personas en el mundo viven en regiones con escasez hídrica, lo que compromete no solo la salud pública, sino también la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria (Liu et al., 2021). En zonas urbanas, esta problemática se agudiza por el aumento continuo de la demanda de agua para consumo en el hogar y la baja eficiencia en el tratamiento y reúso del agua residual, particularmente en zonas del Sur Global (Lakho et al., 2023).

La situación en México no es distinta, ya que la presión sobre los recursos hídricos es elevada: cerca del 76% del agua se destina a la agricultura, mientras que el sector doméstico consume alrededor del 10% (INEGI, 2024). Este alto consumo se relaciona estrechamente con las prácticas de crecimiento urbano y su consecuente infraestructura. En Hidalgo, el 95.7% de las viviendas cuenta con acceso a agua potable, aunque aproximadamente 133 mil personas, en su mayoría de localidades rurales, carecen aún de este servicio (Conagua, 2022). La situación en Pachuca refleja esta dualidad: aunque presenta una cobertura elevada en servicios de agua potable y drenaje, el manejo de las aguas residuales es deficiente: solo el 67.7%

de las plantas de tratamiento operan efectivamente, lo que facilita condiciones de escasez hídrica y la dependencia de la temporada de lluvias (GEH, 2023).

La escasez hídrica no solo se asocia con la falta de disponibilidad del recurso, sino también con su mala gestión, especialmente del agua residual generada en los hogares. Las aguas grises (provenientes de lavamanos, regaderas, lavadoras) representan una fracción significativa del consumo doméstico que puede ser tratada y reutilizada, contribuyendo a disminuir la presión sobre fuentes potables. A pesar de su potencial, diversos estudios destacan la insuficiente implementación de sistemas de reúso doméstico y la falta de normativas técnicas específicas como barreras relevantes (Al Jahmani et al., 2022; Liao et al., 2021).

Este contexto se agudiza durante eventos de sequía prolongada, como los registrados entre 2019 y 2022 en el centro de México, los cuales han evidenciado la vulnerabilidad de las ciudades a fenómenos climáticos extremos. Ante situaciones como esta, se requieren soluciones descentralizadas y resilientes que ayuden a reducir la dependencia de las fuentes de abastecimiento convencionales, limitar el consumo de agua potable, mejorar la eficiencia en el tratamiento desde la fuente y enfocarse hacia un modelo de economía circular en el ámbito urbano. Existen tecnologías como muros verdes, filtros cerámicos, sistemas de captación pluvial y humedales artificiales (entre otras) de escala doméstica, las cuales han demostrado ser viables en contextos urbanos con alta presión hídrica (Torkashvand et al., 2023; Liao et al., 2021).

A partir la revisión de literatura reciente relacionada con estos temas, se identifican vacíos relevantes en cuanto al diseño, viabilidad técnica y evaluación del desempeño de soluciones domésticas para el tratamiento de aguas grises en países como México, donde aún prevalecen enfoques centralizados y poco adaptativos. Esta investigación busca atender dichos vacíos mediante la propuesta de un sistema doméstico de tratamiento de aguas grises, capaz de integrarse a la vivienda urbana promedio y reducir tanto el consumo de agua potable como las emisiones contaminantes generadas por el vertido sin tratar.

El objetivo de este estudio es proponer un diseño e identificar los componentes óptimos de un sistema doméstico de tratamiento de aguas grises

que permita su reúso eficiente, disminuya el consumo de agua potable y promueva una gestión sostenible del recurso desde una perspectiva de economía circular.

Marco teórico

La economía circular (EC) ha emergido como una estrategia clave para redefinir los modelos de producción y consumo en diversos sectores. En el marco del recurso hídrico, la EC promueve una visión regenerativa mediante el reúso, reciclaje y valorización del agua residual, reduciendo así la presión sobre fuentes convencionales y atenuando los impactos ambientales derivados de su sobre extracción (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017).

Si bien el término formal de EC es propuesto por Pearce y Turner (1989), quienes sugirieron sustituir el modelo lineal “tomar-usar-desechar” por uno circular, diversos autores han señalado que sus principios ya se tomaban en cuenta en prácticas tradicionales como la reparación, el reaprovechamiento y la extensión de la vida útil de bienes (Negrei e Istudor, 2018; Morseletto, 2020). Aplicada al ámbito del agua, la EC implica cerrar los ciclos hídricos por medio de estrategias que prioricen la eficiencia en el uso, la recuperación desde la fuente y la reintegración confiable de aguas residuales al entorno urbano o productivo (Calisto et al., 2021).

Tratamiento de aguas grises en viviendas mediante opciones sostenibles

Respecto al tratamiento de aguas grises se han desarrollado y adaptado distintas tecnologías para contextos domésticos; estas toman en cuenta criterios como eficiencia técnica, adaptabilidad espacial, facilidad de mantenimiento y rentabilidad. Los estudios recientes destacan las siguientes (tabla 13.1).

Estas tecnologías se alinean con los principios de EC al facilitar el reúso eficiente del agua gris; también, promueven ahorros significativos en el

Tabla 13.1. *Principales tecnologías de tratamiento del agua gris*

<i>Tecnología</i>	<i>Eficiencia tratamiento</i>	<i>Adaptabilidad</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Usos recomendados</i>	<i>Autores</i>
Filtros cerámicos y de arena	Alta (70-90%)	Alta	Bajo	Riego, descarga sanitaria	Al Jahmani et al., 2022
Muros verdes	Media (50-70%)	Media	Bajo	Riego ornamental	Lakho et al., 2023
Humedales construidos (SSF/VFCW)	Alta (> 90%)	Alta	Bajo-medio	Riego, sanitarios, limpieza	Lakho et al., 2023
Biorreactores de membrana (MBR)	Muy alta (> 95%)	Media	Medio	Todos los usos no potables	Baykal, 2019
Captación + tratamiento combinado	Alta	Alta	Variable	Suplemento pluvial y sanitario	McCarton et al., 2022

Fuente: elaboración propia.

consumo de agua potable (entre 25% y 50%) y favorecen circuitos cerrados a nivel de vivienda (Bolívar et al., 2022; Baykal, 2019).

Potencial de reúso y volúmenes recuperables

El agua gris representa entre el 50% y 80% del volumen total de agua residual doméstica (Liu et al., 2021). De este volumen, entre el 60% y 90% puede recuperarse por medio de sistemas domésticos bien diseñados. Sus usos más comunes incluyen:

- Descarga en inodoros (30-35% del uso total de agua en viviendas).
- Riego de jardines y lavado de pisos o vehículos (10-20% del uso).
- Lavado de ropa (en sistemas con segregación de detergentes biodegradables).

Su reúso permite ahorrar agua potable y reducir la presión hidráulica sobre los sistemas de drenaje y tratamiento convencionales, por lo que contribuye además a mitigar riesgos de saturación e inundaciones (McCarton et al., 2022).

Vacíos en el marco normativo nacional

El enfoque de este estudio responde a una necesidad crítica de innovación frente a vacíos regulatorios en el contexto nacional que limitan la implementación de sistemas sostenibles de reúso de agua en el ámbito doméstico. A partir de una revisión de la normativa vigente, se aprecia que normas como la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022) y la NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021) se orientan principalmente a controlar vertidos y asegurar la calidad del agua para consumo humano, sin considerar explícitamente el reúso descentralizado de aguas grises en viviendas. Aunque existen otras normas como la NMX-AA-164-SCFI-2013 (Secretaría de Economía, 2013), que proporciona una guía para el reúso doméstico, su carácter no vinculante impide su adopción amplia. También, la NOM-003-SEMARNAT-1997 (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1998), aún vigente para ciertos usos de agua residual tratada, no separa entre aguas grises y negras, lo que impide la adecuación tecnológica y normativa que requieren las soluciones sostenibles específicas para aguas grises.

Debido a que el marco regulatorio actual no considera de forma directa las condiciones y necesidades del reúso del agua a nivel doméstico, se requiere una metodología que parta desde la escala local, diseñando sistemas eficientes y replicables que puedan adaptarse a contextos urbanos diversos, especialmente en ciudades con presión hídrica como Pachuca.

Metodología

El contexto metodológico de este estudio plantea el diseño de un sistema integrado de tratamiento de aguas grises, con base en criterios de:

- Viabilidad técnica en viviendas urbanas.
- Eficiencia en la remoción de contaminantes.
- Adaptabilidad espacial.
- Capacidad de escalabilidad hacia políticas públicas.

Este enfoque busca proponer un sistema complementario a la infraestructura convencional por medio de tecnologías de bajo impacto que empaticen con la naturaleza y sea congruente con los principios de economía circular y resiliencia hídrica. En ese sentido el estudio consta de cuatro fases:

- Fase 1. Análisis del consumo de agua doméstica
- Fase 2. Identificación de fuentes de generación de aguas residuales
- Fase 3. Evaluación tecnológica
- Fase 4. Cálculo de volúmenes tratables y requerimientos técnicos

En la primera fase para poder realizar el análisis se investigó primero el consumo de agua promedio en hogares en Pachuca, para ello, se obtuvieron datos del organismo operador de agua en el que se identifica el volumen por mes de cada vivienda, el monto a pagar de acuerdo a la tarifa y la ubicación aproximada de la vivienda, así mismo, se contrastó la información del agua con la obtenida en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2020, para analizar el número de ocupantes, y las características de las viviendas. En la segunda fase, se realizó un diagrama conceptual sobre economía circular identificando el tipo de aguas residuales y sus fuentes, las aguas grises y negras. Después se realizó un segundo diagrama introduciendo el tratamiento doméstico y el reciclaje de aguas grises. Así mismo, en la tercera fase se investigaron tipos de tratamientos y de tecnologías filtrantes para conocer la posibilidad de reciclaje. Por último, se calcularon las cantidades de agua que se pudieran tratar y las necesidades de cambios en las tuberías para conocer una cantidad aproximada de agua reciclada. Cabe señalar que también se analizaron los principales factores que promueven o inhiben la demanda de agua a nivel doméstico.

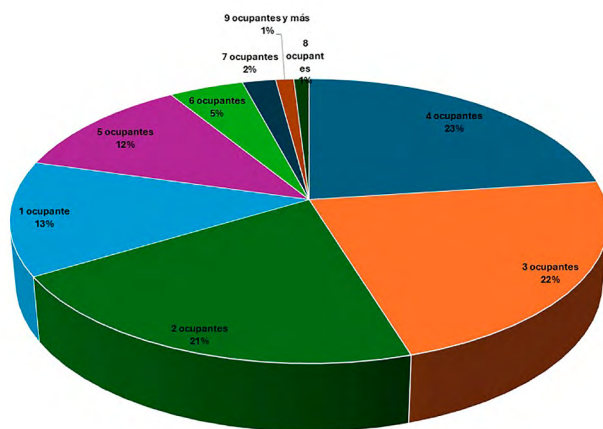
Resultados y análisis

El consumo promedio de agua en una vivienda en la ciudad de Pachuca es de alrededor de 267 litros al día, lo cual representa un uso de aproximadamente 67 litros diarios por persona, pudiendo estos variar dependiendo de factores estacionales como el clima, la temperatura, factores económicos

como nivel de ingreso, infraestructura y tecnología doméstica (regaderas y grifos ahorradores), factores culturales como educación o conciencia ambiental, edad, salud, entre otros. Estas cifras se obtuvieron de acuerdo con información de CAASIM para el año 2008, así como con datos del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020 de INEGI.

En la figura 13.1 se observa que el número de ocupantes por vivienda corresponde en primer lugar a 4 personas con 23%, le siguen las viviendas con 3 integrantes u ocupantes 22%, después las viviendas con 2 personas con 21%, estas tres categorías son las que mayor representan el número de integrantes por vivienda (2 a 4 ocupantes). Luego las viviendas con 1 ocupante con 13% y 5 ocupantes con 12%, las cinco categorías anteriores representan el 91.2% del total de viviendas de Pachuca (INEGI, 2022).

Figura 13.1. Número de ocupantes por vivienda en la ciudad de Pachuca



Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico.

En la tabla 13.2 se presentan los tipos de tarifas cobrados en los recibos de agua dependiendo del consumo promedio por segmentos. La tarifa I corresponde a uso domiciliario que va de los 0 a 8 metros cúbicos al mes, esto es alrededor de 267 litros por día; cabe señalar que en este segmento se encuentra el 96% de las viviendas de Pachuca. La tarifa II corresponde a consumos que pueden ser domiciliarios o de negocios, principalmente de servicios que van de 9 a 12 metros cúbicos al mes, esto es

de 300 a 400 litros diarios, la tarifa III corresponde a consumos que van de 13 a 25 metros cúbicos al mes, es decir de 433 a 833 litros diarios y, por último, la tarifa IV, que va de los 26 a 50 metros cúbicos al mes, esto es de 866 a 1 667 litros diarios, en esta tarifa se encuentran principalmente negocios que requieren mayores cantidades de agua, cabe agregar que hay aún más tarifas para consumos arriba de los 50 metros cúbicos sin embargo, los usuarios son del sector industrial (CAASIM, 2023).

Tabla 13.2. *Tipo de tarifas de agua para la ciudad de Pachuca*

<i>Tarifa</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
Consumo m ³	0 a 8	9 a 12	13 a 25	26 a 50
Consumo (litros/día)	0 a 267	300 a 400	433 a 833	866 a 1667
Porcentaje de viviendas por tipo de tarifa	96.08	3.22	0.14	0.57

Fuente: elaboración propia con datos de CAASIM (2008).

Hanemann (1998) establece que la estimación del consumo y demanda de agua puede llegar a variar dependiendo de factores como el número de ocupantes por vivienda, además de otras características sociodemográficas del hogar, tales como la edad, nivel de escolaridad, género, condición de salud de las personas que habitan la vivienda; aspectos físicos de la vivienda, como el número de baños, número de habitaciones y la existencia y tamaño del jardín; las condiciones climáticas, particularmente la temperatura y la precipitación; hábitos de consumo de los miembros de la vivienda, incluyendo frecuencia de baño, lavado de ropa y prácticas de ahorro de agua; y por último la *tecnología instalada* tales como cisterna, tinaco, llaves ahorradoras, etc. Para ello, Hanemann propone dos funciones, una función general con tres variables dependientes básicas, que son los montos pagados de acuerdo con los precios o tarifas del agua, el nivel de ingreso promedio por vivienda, y el clima, representado por las precipitaciones, la temperatura y estacionalidades (Ec. 1). La segunda función que propone es una función de demanda desagregada, en la que se incluyen variables como número de ocupantes, hábitos de consumo e higiene, la tecnología relacionada con el consumo de agua y la disponibilidad de drenaje (Ec. 2).

$$D = f(P, I, z) \quad (1)$$

Donde:

D = Demanda de agua

P = Monto pagado de acuerdo con la tarifa

I = Ingreso promedio de las personas que habitan la vivienda

z = clima local (precipitaciones y temperatura)

$$D = f(P, I, o, h, \rho, d, z) \quad (2)$$

Donde:

D = Demanda de agua

P = Monto pagado de acuerdo con la tarifa

I = Ingreso promedio de las personas que habitan la vivienda

o = número de ocupantes

h = hábitos de consumo, salud, higiene, ahorro de agua

ρ = factor que representa la tecnología de uso y ahorro del agua

d = disponibilidad de drenaje (esta puede contribuir a un menor o mayor consumo de agua)

z = clima del lugar

Disponibilidad promedio de agua y demanda

ONU-Hábitat (2018) comenta que una dotación mínima de 20 litros diarios de agua por persona para consumo en su vivienda podría ser suficiente en casos extremos, sin embargo, recomienda de 50 a 100 litros diarios por persona, dependiendo de la disponibilidad de agua en cada región. Por su parte, la Conagua (2012) en su estudio “Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México” y en el “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento” (Conagua, 2019) establecen otros parámetros para el abastecimiento de agua, los cuales se basan en el tipo de clima y en el nivel socioeconómico de las viviendas, para el caso de Pachuca, que se encuentra en un tipo de clima seco la dotación de agua rondaría entre 184 y 202 litros por persona al día desde el nivel de ingresos más bajos al más alto (Conagua, 2019, p. 112).

Los estudios de demanda de agua han registrado que el consumo de agua puede variar significativamente de acuerdo con las características del clima de cada región, o las estaciones del año (primavera-verano u otoño-invierno), la demanda de agua en una vivienda puede aumentar desde 20% hasta 70% conforme las temperaturas aumentan (Magaña, Ábrego y Méndez, 2024). Por su parte, las características de las viviendas y el nivel de ingreso por vivienda también representan un factor determinante para el consumo de agua, de hecho, puede ser que se encuentre estrechamente vinculado, pues entre mayor es el ingreso las viviendas cuentan con mayor número de baños, tina, cisterna, jardín, alberca, número de lavabos, es decir mayor consumo (Montecillo, 2017).

En este punto las tarifas juegan un papel importante para incidir en el uso racional del agua, así como en una distribución equitativa, además de obtener recursos para el mantenimiento y construcción de infraestructura hídrica (Ferro y Lentini, 2013). El sistema de pago por tarifas contribuye al ahorro del agua al establecer segmentos con cuotas diferenciadas de acuerdo con la cantidad de agua consumida, empezando con una cuota básica en la que la mayoría de la población tiene acceso al agua, y conforme el consumo es mayor las cuotas van aumentando (Howe y Linaweaver, 1967). Si bien el ingreso disponible es mayor a los consumos mayores, se debe calcular la disposición a pagar y la elasticidad precio del agua para que el efecto de ahorro de agua surta efecto, esta disposición a pagar y la elasticidad precio del agua tienen efecto debido a que las personas requieren el agua y cuentan con un presupuesto establecido (dependiendo de cada nivel de ingreso) para tener acceso al agua, sin embargo, al aumentar el precio del agua ya sea por un mayor consumo o simplemente debido a los costos o escasez, las personas estarán dispuestas a pagar hasta un nuevo límite de su presupuesto, o en su defecto reducir su consumo para no pagar por el aumento (Morales-Novelo et al., 2018; Espey et al., 1997).

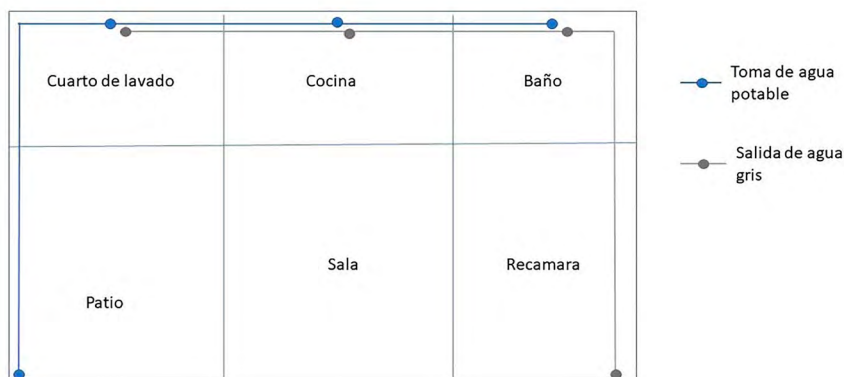
Uso de agua a nivel doméstico

En el caso de México, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Artículo 115, Fracción III, establece que los municipios son los en-

cargados de dotar de agua potable a las viviendas mediante los organismos operadores de agua, así como establecer las cuotas o tarifas de cobro. Bajo el modelo convencional de consumo de agua en las viviendas, el agua es abastecida por una sola fuente, es decir los organismos operadores de agua; en la ciudad de Pachuca el organismo operador es la Comisión de Aguas y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM).

En la figura 13.2 se observa un diagrama que muestra el flujo de agua desde el abastecimiento, su paso por diversos usos, como lavado de ropa, baños, cocina, así como el flujo de aguas residuales tanto grises como negras. Este sistema se puede denominar lineal, ya que pasa por una tubería que distribuye el agua potable para todos los usos en la vivienda, sin importar, que no todos los usos requieren agua potable, y por otro se encuentra la tubería de desagüe para aguas residuales, igualmente solo una tubería mezclando aguas negras con aguas grises sin importar que la mayor proporción del agua se puede reutilizar mediante un sistema de tratamiento doméstico.

Figura 13.2 Diagrama de flujo de agua lineal



Fuente: elaboración propia.

La distribución de agua de acuerdo con los distintos usos de agua dentro de la vivienda se tiene, que el mayor consumo se encuentra en el baño a la hora de la ducha con 48%, le sigue el uso de agua para los inodoros con 19.5%, el uso en la cocina para lavar trastes con 17%, después el lavado de ropa con 9.3% y por último el uso para lavarse las manos y otros usos 5.6% (tabla 13.3).

Tabla 13.3. *Consumo promedio de agua de una vivienda*

<i>Usos</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Litros por vivienda</i>	<i>Tipo de agua</i>
Ducha	48.2	129.0	Gris
Lavado de ropa	9.3	24.8	Gris
Cocina, lavado de trastes	17.4	46.5	Gris
Descarga del inodoro	19.5	52.1	Residual
Lavabo del baño y otros usos	5.6	14.9	Gris

Fuente: elaboración propia con base en Conagua (2012).

Cabe señalar que el agua para consumo humano que se destina para beber y cocinar no entra en estas proporciones. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece los límites permisibles de calidad del agua para consumo humano en México, esta establece los parámetros sanitarios que deben cumplir los organismos responsables de los sistemas de abastecimiento de agua tanto públicos como privados (Conagua, 2012). No obstante, existen problemas en la infraestructura y aún en las mismas viviendas para contar con agua libre de microorganismos, bacterias, entre otros contaminantes. Es decir, los organismos operadores de agua tienen que entregar agua que sea capaz de consumirse o beberse, pero las viviendas tienen la responsabilidad de conservar limpios sus tinacos y contar con filtros para evitar consumir agua contaminada (ANEM, 2024).

Este modelo de consumo de agua lineal en las viviendas ha generado niveles de contaminación y degradación de los acuíferos muy altos, además que se pierden enormes cantidades de agua al mezclar el agua contaminada con el agua limpia de los ríos, además de la contaminación de suelos, generación de infecciones y enfermedades (Lin, Yang y Hu, 2022). Aunado a ello, hay un incremento de las emisiones de CO₂ y metano que producen las aguas residuales tanto por detergentes, así como por las aguas negras; en ese sentido los costos por limpieza y tratamiento de aguas a niveles macro se vuelven incosteables e insostenibles, de ahí que sea necesario cambiar el actual modelo por uno de tipo circular (He et al., 2023).

Agua circular en viviendas

El agua que puede reciclarse o reutilizarse en una vivienda puede llegar a representar entre el 30 y 70% dependiendo de diversos factores, especialmente lo que se refiere a aguas grises, dado que se han encontrado diversos estudios y técnicas que contribuyen al reciclado del agua y su reutilización para segundos usos sin comprometer la salud humana (Jeffrey, 2002; Wanjiru y Xia, 2018; Fane y Reardon, 2013).

Los beneficios de reciclar el agua son múltiples, desde la reducción de la dependencia y del consumo de agua proveniente de los organismos operadores, reducción de los costos de mantenimiento, reducción de la contaminación de mantos acuíferos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mayor conciencia ambiental, entre otros (Abubakar, 2018).

La tabla 13.4 muestra el impacto positivo del agua circular y las áreas dónde se puede reducir la contaminación por la descarga de aguas residuales sin previo tratamiento. De acuerdo con el INECC (2018), las aguas residuales contribuyen con el 1.6% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), esto es de 0.5 a 2.2 kg de CO₂ eq. por cada metro cúbico de agua residual. En la ciudad de Pachuca, las descargas de aguas residuales van de los 120 a 250 litros por vivienda, mientras que el porcentaje de viviendas con acceso a drenaje y saneamiento es de 97.9%, sin embargo, en cuanto a tratamiento en Hidalgo sólo se alcanzan a tratar el 67.7% de las aguas residuales, lo cual representa un déficit de tratamiento de 32.3%. A ello, se agrega la drástica disminución del gasto público en el mantenimiento y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, mientras que en 2012 se destinaron para este rubro 28 350 mdp, para el 2022 se destinaron tan solo 5 726 mdp, cuando la cantidad requerida mínima para su operación se ha calculado en 57 403 mdp (CEFP, 2022).

Otro problema relacionado con la falta de tratamiento de aguas residuales son las enfermedades que ocasionan, en 2015 se registraron en México 3 754 muertes por enfermedades gastrointestinales infecciosas, entre ellas, cólera, amebiasis, hepatitis, salmonelosis. De acuerdo con Blanca Jiménez (UNAM, 2002), solo entre el 10% y 15% de las plantas de tratamien-

Tabla 13.4. *Beneficios del reciclado de agua en viviendas*

Beneficios del reciclado de agua en viviendas
Reducción en el consumo de agua proveniente del sistema de dotación de agua potable
Reducción de costos de operación y mantenimiento en drenajes
Reducción de contaminación de ríos y suelos por aguas residuales
Emisiones de gases de efecto invernadero
Reducción en daño a los ecosistemas
Reducción a la vulnerabilidad de la escasez de agua en ciudades

Fuente: elaboración propia.

to cumplen las normas oficiales de saneamiento, y un alto porcentaje no tiene la capacidad de tratar el agua para ofrecer la calidad debida.

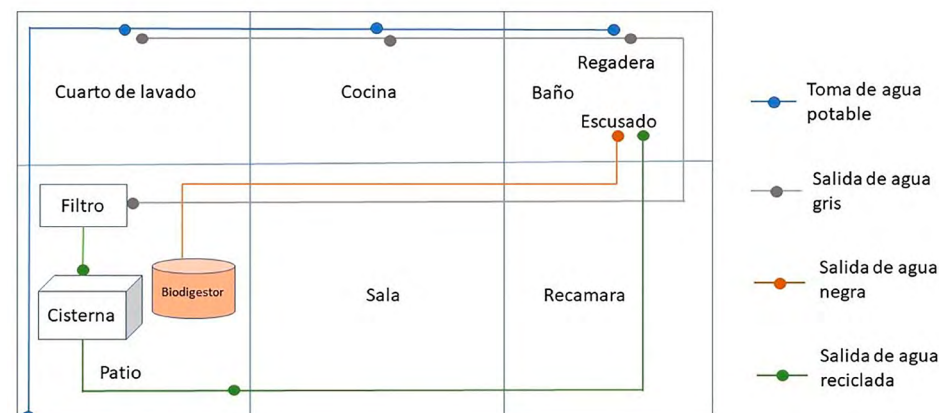
El modelo de agua circular contrasta con el modelo convencional. En la figura 13.3 se observa un diagrama con diversos sistemas de tuberías tanto para la distribución de agua dentro de la vivienda para diversos usos, así como desagüe tanto para aguas grises y aguas negras por separado, mientras en el caso de la dotación se cuenta con el agua proveniente por parte del sistema operador del agua, así como de una segunda fuente que es el agua reciclada, una vez que ha tenido un tratamiento de limpieza y filtrado doméstico.

La línea azul representa la tubería de agua potable proveniente del servicio municipal. La tubería gris representa la salida de aguas grises provenientes del cuarto de lavado, cocina, regadera y lavabos, la cual va a dar a un sistema de filtrado; una tercera tubería dividida de la anterior lleva aguas negras provenientes de los inodoros hacia un biodigestor para eliminar bacterias y malos olores.

Una cuarta y última tubería va desde un repositorio de aguas grises tratadas mediante filtrado hacia los inodoros o para regar el jardín y reutilizarla, así mismo, dependiendo del grado de filtración y limpieza pudiera ser utilizada en usos como lavado de ropa, regadera, lavabos, entre otros.

De acuerdo con Albalawneh, Chang y Akroush (2016), existen diversas formas de filtrado y limpieza del agua, dependiendo principalmente del tipo de filtros y del uso que se le vaya a dar. Dado que las aguas grises tienen un menor contenido orgánico y de DBO, y están libres de materia

Figura 13.3. Diagrama de agua circular en vivienda



Fuente: elaboración propia.

fecal que favorezca la reproducción de bacterias, podrían reciclarse fácilmente mediante diversas técnicas (Prashanna y Heenalisha, 2019).

El reciclaje de aguas grises se está llevando a cabo en diversos países, entre ellos, India y Reino Unido (Abbas y Ali, 2023; Benavides, Ramírez y Bracho, 2016; Kristo, 2018), debido a la escasez y a la posibilidad de contar con agua de una manera segura y con costos menores. Además de este tipo de estrategias de tratamiento de agua o reciclaje de agua, se encuentran otras como la captación de agua de lluvia, el uso de jardines verticales para el filtrado de aguas grises, el uso de biodigestores para producción de biogás, entre otros (Mohamed, Shamsudin y Mohd, 2020; Parsons et al., 2010; Aguirre et al., 2024).

En la tabla 13.5 se observa la dotación de agua diaria promedio por vivienda, además de otros indicadores como el volumen de aguas residuales por tipo, ya sean aguas grises o negras, el volumen de tratamiento y, por último, el volumen disponible, y el porcentaje de ahorro por reciclar el agua.

Cabe señalar que algunas de las dificultades para realizar este modelo es la necesidad de reconstruir las tuberías para poder realizar el reciclado, específicamente para casas ya construidas, por el contrario, las casas nuevas se pudieran realizar ajustes a sus instalaciones.

Tabla 13.5. *Cantidad de agua ahorrada por reciclamiento mediante filtración*

<i>Uso del agua</i>	<i>Cantidades o porcentajes</i>	<i>Cantidades o porcentajes</i>
Dotación de agua por vivienda	267 litros	267 litros
Aguas grises	214.9 litros	214.9 litros
Aguas negras	52.1 litros	52.1 litros
Pérdidas	26.7 (10%)	53.4 (20%)
Agua reciclada gris	193.4	171.9
Ahorro	72.4%	64.4%

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El agua, como recurso natural escaso debe aprovecharse de forma sostenible, es por ello que se buscan nuevos modelos de reciclaje de aguas grises para vivienda para combatir la creciente escasez del vital líquido y reducir la presión sobre el gasto público para tratamiento de aguas residuales, el cual no solo cada vez es menor, sino que se requieren de cantidades exorbitantes para poder limpiar el agua que daña ecosistemas, la salud humana de las personas que viven cerca de los ríos o presas que llevan aguas residuales, además de las emisiones de GEI, entre otros impactos negativos.

El análisis de la viabilidad de reciclaje de aguas grises resulta positivo y factible, especialmente para reutilizar el agua en primer lugar para inodoros, dependiendo el grado de filtración, en segundo otros usos como limpieza de ropa, ducha, etc. Las limitantes o consideraciones para implementar son, por un lado, la redistribución y división de las tuberías, para separar las aguas negras de las aguas grises, mientras que las aguas negras pueden ir hacia un biodigestor, las aguas grises pudieran ir hacia una cisterna, que previamente ha sido limpiada y filtrada.

Referencias

Abbas, E. K. y Ali, S. A. K. (2023). Evaluación de un sistema de percolación biológica con diferentes capas de material para el tratamiento de aguas grises. En *IOP Conference*

- Series: Earth and Environmental Science* (vol. 1232). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1232/1/012018>
- Abubakar, I. R. (2018). Estrategias para afrontar el suministro inadecuado de agua doméstica en Abuja, Nigeria. *Water International*, 43(5), 570-590. <https://doi.org/10.1080/02508060.2018.1490862>
- Aguirre, E., Lizárraga, L., Coronel-Olivares, C. (2024). Performance of construction and demolition waste coupled with selected vascular plants for greywater treatment in natural solutions. *Waste Biomass Valor*, 15, 5463-5473. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02510-7>
- Al Jahmani, A. K., Rao, L. N., Varghese, M. J. y Al-Shehhi, M. (2022). Recycling of greywater using sustainable domestic technologies: Performance and limitations. *Journal of Environmental Management*, 305, 114354.
- Albalawneh, A., Chang, T. K. y Akroush, S. (2016). Reusing treated greywater for irrigating home gardens: Understanding user experiences. *Taiwan Water Conservancy*, 64(1), 105-115.
- Asociación Nacional de Entidades de Aguas y Saneamiento de México (ANEAS). (2024). Lineamientos de cumplimiento para la NOM-127-SSA1-2021. <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-oficiales/11-lineamientos%20NOM-127-SSA1-2021.pdf>
- Baykal, B. B. (2019). Recycling/reusing grey water in households: A key strategy in circular water economy. *Journal of Environmental Management*, 238, 1-7.
- Benavides, A., Ramírez-Guerrero, T. y Bracho, G. (2016). Desarrollo de un prototipo de un sistema automático de recolección y reciclaje de aguas grises. *Agunkuya*, 6, 40-48. <https://doi.org/10.33132/issn.2027-9574>
- Bigurra-Alzati, C. A., Ortiz-Gómez, R., Vázquez-Rodríguez, G. A., López-León, L. D. y Lizárraga-Mendiola, L. (2021). Water conservation and green infrastructure adaptations to reduce water scarcity for residential areas with semi-arid climate: Mineral de la Reforma, Mexico. *Water*, 13(1), 45. <https://doi.org/10.3390/w13010045>
- Bolivar, V., Poganietz, W.-R. y Fröhling, M. (2022). Integration of greywater reuse in the circular economy: A multi-criteria evaluation. *Water Research*, 213, 118148. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118148>
- Calisto, M., Vermeulen, W. y Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104917>
- Calisto, M., Vermeulen, W. y Salomone, R. (2021). Analyzing European Union circular economy policies: Words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (2022). *Evolución del gasto en materia hídrica 2012-2022* [Nota informativa]. Cámara de Diputados. <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2022/notacefp0422022.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2012). *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México*. CIDE / Semarnat.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado*

- y saneamiento: Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Semarnat. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/sgapds-1-15-libro4.pdf>
- Drangert, J. O. y Kjerstadius, H. (2023). Reciclaje: El futuro sumidero urbano de aguas residuales y residuos orgánicos. *City and Environment Interactions*, 19, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100104>
- Engelenhoven, T., Kassahun, A. y Tekinerdogan, B. (2021). Circular business processes in the state-of-the-practice: A survey study. *Sustainability*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313307>
- Espey, M., Espey, J. y Shaw W. D. (1997). Price elasticity of residential demand for water: A metaanalysis. *Water Resources Research*, 33(6), 1369-1374. <https://doi.org/10.1029/97wr00571>
- Ferro, G. y Lentini, E. (2013). *Políticas tarifarias para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM): Situación actual y tendencias regionales recientes* (Documento de proyecto). CEPAL / Ministerio de Asuntos Exteriores de Francia.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. y Hultink, E. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gifreu Font, J. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante el cambio climático: Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, (52), 102-158. <https://doi.org/10.71296/raap.129>
- Gobierno del Estado de Hidalgo (GOH). (2023). *Plan estatal de desarrollo 2022-2028*. <https://bibliotecadigitaluplaph.hidalgo.gob.mx/Biblioteca%20Digital%20de%20Planeación/Estatal/Plan%20Estatl%20de%20Desarrollo%202022-2028.pdf>
- Gómez-Azpeitia, G., Tejeda-Martínez, A., Herrera-Sosa, L. C. (2023). *Arquitectura, confort y cambio climático* (pp. 216-222). Puerta Abierta. <https://www.uv.mx/peccuv/files/2023/10/Arquitectura-Confort-y-Cambio-Climatico.pdf>
- Hanemann, M. (1998). Price and rate structure. En *Advances in the economics of environmental resources*, vol. 1: *Marginal cost rate design and wholesale water markets*. Jai.
- Harris, S., Martin, M. y Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018>
- He, Y., Li, Y., Li, X., Liu, Y., Wang, Y., Guo, H., ... y Liu, Y. (2023). Net-zero greenhouse gas emission from wastewater treatment: Mechanisms, opportunities and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113547>
- Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3-4), 251-288. <https://doi.org/10.1504/ijge.2017.089856>
- Howe, C. W. y Linaweaver, F. P. (1967). The impact of price on residential water demand and its relationship to system design and price structure. *Water Resources Research*, 3(1), 13-32. <https://doi.org/10.1029/wr003i001p00013>

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990-2015*. Semarnat.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Cuéntame de México: Sección educativa, Geografía, usos del agua*. https://cuentame.inegi.org.mx/explora/geografia/usos_del_agua/
- Jeffrey, P. (2002). Actitudes públicas respecto al reciclaje de agua en el hogar en Inglaterra y Gales. *Water and Environment*, 16(3), 214-217. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2002.tb00397.x>
- Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualización de la economía circular: Un análisis de 114 definiciones. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kristo, K. (2018). Reutilización innovadora del agua mediante un esquema de redistribución: Beneficios y desafíos. *Revista Europea de Estudios Interdisciplinarios*, 4(3), 54-60. <https://doi.org/10.26417/ejis.v4i3.p54-60>
- Lakho, F. H., Le, H. Q., Mattheeuws, F., Igodt, M. et al. (2023). Decentralized water systems and circular economy in the global south: A policy perspective. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104457. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104457>
- Liao, X., Chai, L. y Liang, Y. (2021). Income-based adoption of household greywater reuse systems: A comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>
- Lin, L. yang, H. y Xu, X. (30 de junio de 2022). Efectos de la contaminación del agua en la salud humana y la heterogeneidad de las enfermedades: Una revisión. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Liu, G. y Zhang, F. (2022). Inequality of household water footprint consumption in China. *Journal of Hydrology*, 612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128241>
- Liu, S., Butler, D., Memon, F., Makropoulos, C., Avery, L. y Jefferson, B. (2021). Global water scarcity and urban water reuse potential. *Resources, Conservation & Recycling*, 173, 105748.
- Magaña, V., Ábrego, C. y Méndez, B. (2024). El clima cambiante y los consumos domésticos de agua en ciudades de México. *Investigaciones Geográficas*, (114), e60850. <https://doi.org/10.14350/rig.60850>
- McCarton, L., O'Hogain, S. y Nasr, A. (2022). Greywater reuse for sustainable urban water management: Lessons from Europe. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102208.
- Mohamed Zaki, M. B. A., Shamsudin, R. y Mohd Yusoff, M. Z. (2020). Portable biodigester system for household use: A review. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*, 2(2). <https://doi.org/10.36877/aafrj.a0000148>
- Montecillo Cedillo, J. L. (2017). Suministro de agua potable en México: Más allá del crecimiento poblacional. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 21-33. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-02>
- Morales-Novelo, J. A., Medina, C. M., Tapia, L. y Fernández, D. (2022). Household water

- consumption on the outskirts of Mexico City. *International Journal of Hydrology*, 6(3), 110-117. <https://doi.org/10.15406/ijh.2022.06.00310>
- Morales-Novelo, J. A., Rodríguez, L. y Revollo, D. A. (2018). Inequality in access to drinking water and subsidies between low- and high-income households in Mexico City. *Water*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/w10081023>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Negrei, C. y Istudor, N. (2018). Circular economy: Between theory and practice. *Amfiteatru Economic*, 20(48). <https://doi.org/10.24818/ea/2018/48/498>
- Neunteufel, R., Richard, L. y Perfler, R. (2014). Water demand: The Austrian end-use study and conclusions for the future. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(2), 205-211. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.190>
- ONU-Hábitat. (2018). *The global water operators' partnerships alliance (GWOPA) strategy 2013-2017*. <https://unhabitat.org/evaluation-of-the-global-water-operators-partnerships-alliance-gwopa-strategy-2013-2017-1-2018>
- Parsons, D., Goodhew, S., Fewkes, A. y de Wilde, P. (2010). The perceived barriers to the inclusion of rainwater harvesting systems by UK house building companies. *Urban Water Journal*, 7(4), 257-265. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2010.500331>
- Petit-Boix, A. y Leipold, S. (2018). Circular economy in cities: Reviewing how environmental research aligns with local practices. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1270-1281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.281>
- Plastinina, I., Teslyuk, L., Dukmasova, N. y Pikalova, E. (2019). Implementation of circular economy principles in regional solid municipal waste management: The case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resources*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/resources8020090>
- Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 50(1), 24-39. <https://doi.org/10.15359/rca.50-1.2>
- Prashanna Rangan, R. y Heenalisha, K. (2019). Grey-water treatment and reuse: A review. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 8(1), 5-9. <https://doi.org/10.51983/ajsat-2019.8.1.1042>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C. y Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-164-SCFI-2013: Edificación sustentable: Criterios y requerimientos ambientales mínimos. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5316489&fecha=15/10/2013
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2022). NOM-001-SE-MARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap). (1998). Norma

- Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998
- Secretaría de Salud. (2021). NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=22/03/2022
- Torkashvand, J., Sheini, S., Azizi, S. N. y Arfaeinia, H. (2023). Performance evaluation of green wall systems in decentralized greywater treatment. *Ecological Engineering*, 185, 106891.
- Usha, D. y Anslin, J. (2019). Tratamiento de aguas grises para ciudades inteligentes mediante el Internet de las Cosas (IoT). *Revista Internacional de Tecnología e Ingeniería Reciente*, 8(no. esp. 5), 114-116. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1025.0782S519>
- Velenturf, A. P. M. y Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437-1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Wanjiru, E. y Xia, X. (2018). Sustainable energy and water management for residential homes with integrated optimal recycling of grey and rainwater. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1151-1166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.212>
- Yong, R. (2007). The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 121-129. <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0183-z>
- Zúñiga, V., Leiva, S., Riquelme, C., Gómez, G., Vidal, G. y Neumann, P. (2023). Assessing the environmental impacts of household water supply: A case study considering consumption patterns within a life-cycle perspective. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15031946>