

¿Son realmente las aguas residuales un desecho?

Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez¹

Dr. Ulises Rojas Zamora¹

Dra. Alejandra Montserrat Navarrete López¹

Dra. Mabel Vaca Mier²

¹Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco

²Departamento de Energía, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco

Resumen

El objetivo de este trabajo es describir el panorama de los recursos hídricos en México, dando énfasis a la gestión de las aguas residuales como una alternativa sustentable para solventar el problema de escasez y sobreexplotación de las cuencas. La información recabada muestra que el país está en una crisis hídrica aguda, derivada de la sobreutilización del recurso, la contaminación de los cuerpos receptores y la baja cobertura de los servicios de agua potable y saneamiento básico. Esto hace que, entre otras cosas, las aguas residuales sean usadas para regar cultivos sin recibir ningún tratamiento previo, lo que representa un grave riesgo a la salud pública. Como alternativa al problema, en este artículo se explora el uso de las aguas tratadas. Además, se describen nuevos conceptos y soluciones para el tratamiento de las aguas residuales, los cuales buscan la reducción en el consumo de energía y productos químicos nocivos para el ambiente, así como la recuperación de recursos valiosos, tales como energía en forma de metano, nutrientes que pueden ser utilizados como fertilizantes y otros productos de valor agregado como fermentados, bioplásticos y exopolisacáridos.

Abstract

This work aims to describe the water resources panorama in Mexico, emphasizing wastewater management as a sustainable alternative to solve water scarcity and overexploitation of watersheds. The information collected shows that the country is in an acute water crisis, derived from water overuse, receiving bodies pollution, and the low coverage of drinking water and basic sanitation services. Therefore, wastewater is used to irrigate crops without receiving any previous treatment, representing a serious risk to public health. As

an alternative to the problem, this article explores reclaimed water reuse. Moreover, new concepts and solutions for wastewater treatment are described, seeking to reduce energy consumption and harmful chemical products, and valuable resources recovery, such as energy in the form of methane, nutrients that can be used as fertilizers, and other value-added products like bioplastics and exopolysaccharides.

Panorama del acceso al agua potable y saneamiento básico

El agua es un recurso esencial en el desarrollo de la vida y el equilibrio ecológico. También, es necesaria para el sostenimiento de todos los organismos vivos de los diversos ecosistemas y el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los pueblos, al ser fundamental para muchos procesos industriales que producen distintos bienes de consumo, además de ser una materia prima en la producción de energía a partir de fuentes renovables.

En julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció los derechos humanos al agua potable y al saneamiento. Sin embargo, estos derechos sufren graves amenazas a medida que la población mundial crece y compite por su acceso frente a las demandas agrícolas e industriales. Las estadísticas de la ONU indican que, en 2019, 2,200 millones de personas carecían de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura; mientras que más de la mitad de la población mundial (4,200 millones de personas) no contaban con servicios de saneamiento básico. De hecho, al menos 673 millones de personas, en su mayoría mujeres y niñas, continuaban con la defecación al aire libre, lo que representa un agravio a la dignidad humana y una amenaza para la salud, el bienestar y la seguridad personal de quienes se ven obligados

a practicarla: De acuerdo con UNICEF, un gramo de heces contiene 10 millones de virus, un millón de bacterias y mil quistes de parásitos (ONU, 2019).

No obstante, es inaplazable trabajar por estos derechos puesto que el acceso a fuentes confiables y seguras de agua y a sistemas de saneamiento son vitales para garantizar el bienestar, la salud y la productividad económica de la población.

En México, la situación del agua refleja lo que actualmente sucede a nivel mundial. De acuerdo con el INEGI, el país se caracteriza por una distribución desigual de los recursos hídricos: las zonas del centro y del norte son mayormente áridas y semiáridas y reciben anualmente sólo el 9% del agua renovable, la cual es definida por la CONAGUA como “la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema y que se renueva por medio de la lluvia” (CONAGUA, 2018). Por su parte, las regiones del sur y sureste reciben el 67.2% del agua renovable, pero sus habitantes tienen menor acceso debido a la falta de servicios de suministro de agua (INEGI, 2019).

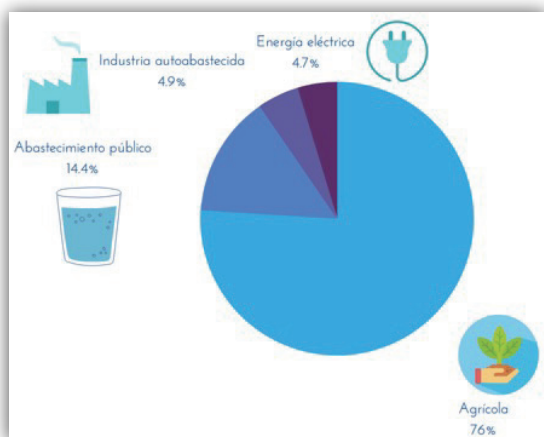


Figura 1. Principales usos del agua en México (Fuente: CONAGUA, 2018).

Los principales usos del agua en México se muestran en la **Figura 1**. El sector productivo que utiliza la mayor parte del agua potable en México es el agrícola; no obstante, en este sector se desperdicia hasta el 57% del recurso debido a la falta de infraestructura moderna y adecuada para el riego (CONAGUA, 2018).

Otro grave problema relacionado con el acceso de fuentes seguras de agua potable es la sobreexplotación de los acuíferos: El número de acuíferos sobreexplotados aumentó 5 veces en el periodo comprendido entre 1975 y 2019. Por si fuera poco, en 2016, la CONAGUA reconoció que el 16% de los acuíferos del país están en franca sobreexplotación, 5% presentan agua salobre y 3% tienen problemas de intrusión salina en sistemas costeros (Noyola y Mazari, 2018). Además, debido al crecimiento poblacional, la disponibilidad de agua por habitante ha disminuido casi nueve veces en el último siglo, pasando de 31,000 m³/habitante-año en 1910 a sólo 3,586 m³/habitante-año en 2019.

El panorama del acceso a sistemas de saneamiento no es diferente; durante 2017, las 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en el país trataron 135.6 m³/s, lo que representó sólo el 63% del total de aguas residuales recolectadas en los sistemas de alcantarillado (215.2 m³/s). Esto representa un riesgo para la calidad ambiental de los ecosistemas y la salud, pues la descarga de aguas residuales sin previo tratamiento en cuerpos receptores, como ríos, lagos o mares, provoca su contaminación, lo que conlleva a enfermedades y riesgos para la población, así como a la muerte de diferentes especies de flora y fauna acuática (CONAGUA, 2018). En efecto, de acuerdo con las estadísticas del INEGI, en 2019, las enfermedades infecciosas intestinales fueron la sexta cau-

sa de muerte de niños menores de un año en México (INEGI, 2019). En este sentido, la ONU sostiene que la contaminación del agua y la falta de saneamiento básico dificultan la erradicación de la pobreza extrema y el combate a las enfermedades (ONU, 2019).

Aunado a esto, factores externos como la sequía que durante el año 2020 sufrió el país, atribuida al cambio climático, agravan el panorama de los recursos hídricos en México. El informe mundial 2020 de la ONU sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos estimó que, por cada grado de aumento en la temperatura global, cerca del 7% de la población mundial estará expuesta a una disminución del 20% en el acceso al agua (ONU, 2020).

Todos estos hechos revelan que el acceso y la calidad de los recursos hídricos, tanto a nivel mundial como en México, se encuentran en crisis y se requiere una respuesta integral por parte de la sociedad en su conjunto para afrontarla. Ante este panorama, es necesario contemplar la aplicación de diversas medidas, como la recuperación y manejo adecuado de las áreas de conservación, la recolección del agua lluvia en las ciudades como fuente alternativa de abastamiento y el uso de tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de las aguas residuales como estrategias para mejorar la gestión del agua, lo que a su vez servirá para disminuir la pobreza y desigualdad social.

¿Qué son las aguas residuales?

Los seres humanos generan desechos líquidos y sólidos, así como emisiones a la atmósfera producto de sus actividades. Los desechos líquidos se conocen como **aguas residuales** y están constituidas por todos los residuos líquidos y sólidos

que traen consigo las aguas producidas en los hogares, industrias y establecimientos comerciales (Metcalf & Eddy, 2014).

Si las aguas residuales no son correctamente colectadas y tratadas, representan un grave riesgo para la salud pública y el ambiente, pues contienen microorganismos patógenos causantes de graves enfermedades y epidemias, nutrientes que estimulan el crecimiento indeseado de plantas acuáticas en los cuerpos de agua receptores, además de compuestos que pueden ser tóxicos. La presencia de materia orgánica en el agua residual también ocasiona que las aguas residuales se vuelvan sépticas, con la subsecuente generación de malos olores y un color negro, característico de la fermentación parcial de la materia orgánica presente en las mismas, afectando gravemente la capacidad de los cuerpos receptores para sostener los ecosistemas acuáticos.

La principal característica física de las aguas residuales es la presencia de **sólidos**, los cuales están constituidos por todo el material flotante, sedimentable, coloidal y disuelto presente, abarcando una gran variedad de materiales orgánicos e inorgánicos. Por su parte, los **nutrientes** de mayor importancia presentes en las aguas residuales son **el nitrógeno** y **el fósforo**. El primero se encuentra de manera abundante en las aguas residuales domésticas derivado de la orina y las heces, mientras que el segundo proviene principalmente del uso extensivo de detergentes sintéticos. Ambos nutrientes son esenciales para el crecimiento de diversos tipos de microorganismos, plantas y animales. Cuando se descargan aguas residuales con altas concentraciones de nutrientes, se suele desarrollar el fenómeno de eutrofización, el cual se caracteriza

por un crecimiento desmedido de algas de distintas especies en la superficie de los cuerpos receptores, provocando la muerte de la fauna acuática debido a que se impide la difusión de la luz del sol y del oxígeno del aire hacia el agua (Manahan, 2017).

La **materia orgánica** en las aguas residuales está compuesta por una combinación de proteínas (40 - 60%), carbohidratos (25 - 50%) y grasas y aceites (8 - 12%). La urea, proveniente de la orina, es otro compuesto orgánico importante. Además, puede haber cantidades variables de una gran gama de moléculas orgánicas sintéticas, con las más diversas estructuras. Como ejemplo, Eriksson et al. (2002) reportan la presencia en las aguas residuales domésticas de hasta 900 compuestos orgánicos sintéticos de difícil degradación, derivados del uso de productos de limpieza, cuidado personal y medicamentos.

La cantidad de materia orgánica se mide, principalmente, como **demanda biológica de oxígeno (DBO)** y **demanda química de oxígeno (DQO)**. La diferencia entre estos dos parámetros es que el primero mide solamente la materia orgánica biodegradable, mientras que el segundo mide la totalidad de la materia orgánica, sin importar su grado de biodegradabilidad (Metcalf & Eddy, 2014). En conjunto, ambas mediciones son útiles para indicar las condiciones tóxicas que puedan estar presentes en un agua residual, así como la presencia de sustancias orgánicas resistentes a la degradación biológica.

Los **organismos patógenos** encontrados en las aguas residuales son excretados en las heces por los humanos y animales. Las especies de bacterias más comunes pertenecen al género *Salmonella*. También se encuentran especies de *Vibrio*, *Mycobacte-*

rium, *Clostridium*, *Leptospira* y *Yersinia*. El *Vibrio cholerae* es el agente patógeno que produce el cólera, mientras que el *Mycobacterium tuberculosis* puede causar brotes de esta enfermedad. *Escherichia coli* y ciertas cepas de *Pseudomonas* causan gastroenteritis. Entre los protozoos más importantes se encuentran el *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia*, los cuales ocasionan diarrea severa, cólicos estomacales, náuseas y vómitos por periodos prolongados. Entre los helmintos, está *Ascaris lumbricoides*, considerado como la infección parasitaria con mayor prevalencia a nivel mundial. Otros helmintos encontrados son *Trichuris trichiura* y algunas especies de *Taenia*. Finalmente, más de cien virus diferentes, causantes de enfermedades, incluyendo el virus SARs-COV-2 pueden ser excretados en las heces (Ahmed et al., 2020; Metcalf & Eddy, 2014).

En México, las aguas residuales se clasifican como **municipales** (generadas en los núcleos poblacionales y colectados en los sistemas de alcantarillado urbanos y rurales) y **no municipales** (generadas por otros usos, como la industria, que no se colectan en los alcantarillados y se descargan a los cuerpos de agua) (CONAGUA, 2018).

Manejo de las aguas residuales en plantas de tratamiento

Para evitar los efectos negativos provocados por la descarga de las aguas residuales en los cuerpos receptores, es fundamental aplicar un tratamiento que permita la eliminación de todas las sustancias nocivas y agentes patógenos para impedir su dispersión, protegiendo la salud de las comunidades y el ambiente. Esto es especialmente importante cuando cantidades crecientes de aguas tratadas se descargan en cuerpos de agua que, posteriormente,

son utilizados como fuentes de abastecimiento de agua potable.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son las instalaciones destinadas para la depuración y estabilización de las aguas residuales. Tradicionalmente se han diseñado para responder a las preocupaciones estéticas, ambientales y de cuidado a la salud pública relacionadas con la gestión de las aguas residuales. Están constituidas por métodos de tratamiento en donde la remoción de contaminantes se logra a través de métodos físicos, químicos o biológicos, conocidos como **procesos unitarios** (Metcalf & Eddy, 2014).

El nivel de tratamiento deseado en la PTAR debe considerar las condiciones y necesidades de la comunidad beneficiada, la aplicación del conocimiento y experiencia en ingeniería, así como la normatividad ambiental vigente. Estos niveles de tratamiento se alcanzan por la combinación de diversos procesos unitarios y se clasifican como preliminar,

primario, secundario, terciario y avanzado. En la **Tabla 1** se definen estos niveles de tratamiento.

En la Figura 2 se muestran las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de las aguas municipales en el país, por caudal tratado, en 2017. La mayor parte de estos procesos corresponden a tratamientos secundarios, cuyo objetivo principal es remover la materia orgánica del agua residual (Metcalf & Eddy, 2014).

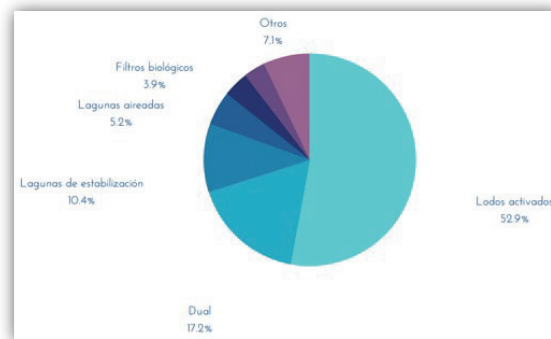


Figura 2. Tecnologías más utilizadas para el tratamiento de las aguas municipales, por caudal tratado, en 2017 (Fuente: CO-NAGUA, 2018).

Tabla 1. Niveles de tratamiento de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2014)

Nivel de tratamiento	Descripción
Preliminar	Busca la remoción de sólidos flotantes de gran tamaño (>2.5cm), arena y grasa que pueden ocasionar problemas operacionales en la PTAR
Primario	Remoción de sólidos suspendidos que se lleva a cabo en un sedimentador. Se convierte en primario avanzado si se utiliza la adición de un químico o la filtración para mejorar la remoción de sólidos
Secundario	Remoción de materia orgánica biodegradable, generalmente, en reactores biológicos (donde se utilizan bacterias para remover contaminantes)
Terciario	Remoción de nutrientes. La desinfección también se considera un tratamiento terciario
Avanzado	Remoción adicional de sólidos disueltos y suspendidos después de los tratamientos convencionales

Como ya se mencionó, en 2017, las 2526 PTAR existentes en el país trataron sólo el 63% de las aguas residuales recolectadas en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2018). Además, actualmente algunas entidades federativas como Chiapas, Jalisco, Tamaulipas, Tlaxcala y el Estado de México tienen más del 50% de sus PTAR fuera de operación (Noyola y Mazari, 2018). De acuerdo con entrevistas autoridades y operadores, este problema está asociado con los altos consumos de energía y costos de operación de los sistemas. Para empeorar la situación, muchos municipios que cuentan con una PTAR tienen deudas significativas derivadas del adeudo adquirido para la edificación de la misma, añadidos a los costos de operación y mantenimiento. Como consecuencia, más de la mitad de las PTAR municipales en México presentan una clasificación de pésimo a mal funcionamiento (Noyola y Mazari, 2018).

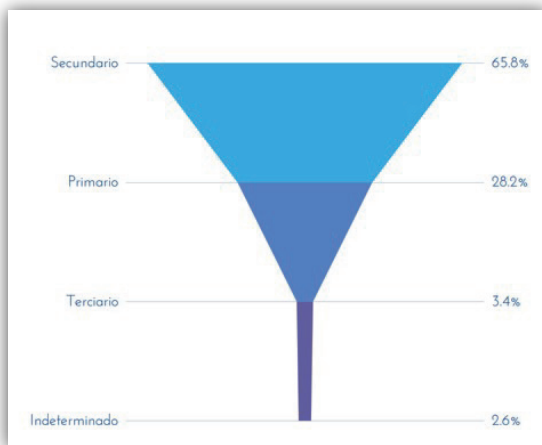


Figura 3. Nivel de tratamiento de las aguas no municipales en 2017 (Fuente: CONAGUA, 2018)

También en 2017, se produjeron 218.1 m³/s de aguas residuales no municipales, pero sólo se trató el 38.4% en 3025 PTAR en operación a nivel nacional (CONAGUA, 2018). En la **Figura 3** se ilustran los nive-

les de tratamiento en las aguas no municipales (industriales). Al igual que en el caso del tratamiento de las aguas residuales municipales, el nivel de tratamiento dado a las aguas industriales es secundario.

Estos datos evidencian que, pese a que existe una infraestructura para el tratamiento de aguas residuales, esta es insuficiente para satisfacer las demandas de saneamiento de la población en México, debido a problemas de obsolescencia y a altos costos de inversión y operación. Además, la falta de estudios y proyectos para nuevas instalaciones, así como los problemas económicos y sociales del país, dificultan la construcción de nuevas obras.

Reúso de aguas residuales en México

Como ya se ha señalado, la problemática del agua y la necesidad de alcanzar la seguridad hídrica son prioritarias para México. Esto ha llevado a que las aguas residuales no sean consideradas como un desecho sino como un recurso que debe ser reutilizado. De hecho, México es el segundo país en el mundo, luego de China, en utilizar las aguas residuales para regar directamente cultivos. Sin embargo, esto representa una mala práctica que genera problemas de contaminación por patógenos o por sustancias orgánicas tales como residuos de los productos de aseo y cuidado personal, combustibles, solventes, plásticos, entre otros, conocidos como “*contaminantes emergentes*”, los cuales pueden tener efectos adversos en la calidad de los ecosistemas y la salud cuando los alimentos son consumidos (Noyola y Mazari, 2018).

Así, las aguas tratadas se convierten en una alternativa segura para sustituir el uso de las aguas residuales crudas, que se pueden emplear para el riego de jardines y cultivos, en algunos usos industriales

como plantas de energía, industrias de la pulpa de papel, torres de enfriamiento, o cualquier otro uso que no requiera agua potable. A nivel urbano, las aguas tratadas se pueden emplear para el combate de incendios, en sistemas de aire acondicionado, construcción y descarga de sanitarios (Metcalf & Eddy, 2014).

El reúso de las aguas tratadas también representa una ventaja adicional debido a su menor costo, permitiendo disminuir la presión sobre las fuentes de abastecimiento al satisfacer las demandas que no requieren calidad de agua potable como, por ejemplo, el riego de áreas urbanas. En 2017, CONAGUA estimó que 39.8 m³/s de aguas tratadas se reusaban directamente (antes de ser descargadas) y 78.8 m³/s indirectamente (después de ser descargadas). Asimismo, calculó que 8.6 m³/s de aguas tratadas sustituyeron aguas de primer uso (CONAGUA, 2018).

Pero, ¿las aguas tratadas son lo único que se puede obtener en una PTAR? La próxima sección aborda esta pregunta.

Las PTAR como fuente de recursos y energía: el concepto de biofábricas

La gestión adecuada y el tratamiento de las aguas residuales ha traído múltiples beneficios a la humanidad como el control de enfermedades, la mejora en la salud pública y la calidad ambiental en las ciudades, así como la mitigación de los impactos ambientales adversos por el mal manejo y disposición de las aguas residuales. No obstante, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido que se creen nuevos conceptos y soluciones, más allá del tratamiento convencional de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2014).

Dos conceptos son ahora el foco en el ma-

nejo de las aguas residuales: (1) la reducción en el consumo de energía y químicos en las PTAR y (2) la recuperación de recursos valiosos. Así, dentro de esta nueva concepción de las PTAR, se busca obtener nuevos recursos con alto valor agregado a través de la biotransformación de los constituyentes de las aguas residuales en productos de valor, convirtiéndolas así en **biofábricas** (Puyol *et al.*, 2020).

Bajo este nuevo concepto de biofábrica, las PTAR convencionales se transforman para mejorar la calidad del agua tratada, promoviendo el uso eficiente de materiales y energía, al mismo tiempo que se recuperan recursos y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos. La necesidad de PTAR más sustentables es particularmente relevante en países en vías de desarrollo como México, donde como ya se expuso, la cobertura de saneamiento es insuficiente.

Recursos que se pueden obtener de las aguas residuales domésticas

El desarrollo de procesos biotecnológicos para el tratamiento de aguas residuales, es decir, de procesos que involucran microorganismos de las más diversas especies, ha permitido la recuperación de productos de valor agregado y de energía. De esta manera, es posible obtener productos químicos como ácidos orgánicos y alcoholes a través de la fermentación de las aguas residuales y la posterior extracción del producto fermentado.

Aunque los nutrientes recuperados del agua residual no podrían suplir por sí mismos la demanda de fertilizantes a nivel mundial, se estima que el 20% del nitrógeno y fósforo producido se encuentra en el agua residual doméstica y es potencialmente recuperable (Matassa *et al.*, 2015).

Además, el aumento en los últimos años en los precios de los fertilizantes, así como el agotamiento de las fuentes naturales de las cuales se extraen, han impulsado la investigación en este campo y su recuperación del agua residual a través de la obtención de estruvita (fosfato de magnesio y amonio) (REMTAVARES, 2017)

Si bien la recuperación de nitrógeno a partir del agua residual no es económicamente rentable en comparación con el proceso tradicional de producción de Bosch-Haber, existe una gran preocupación por el nitrógeno que se emite a la atmósfera en forma de óxidos de nitrógeno, el cual supera ampliamente la capacidad de absorción del ambiente (REMTAVARES, 2017). Los óxidos de nitrógeno son importantes contaminantes atmosféricos, con efectos adversos en la salud, influencia en el cambio climático y en la formación de oxidantes troposféricos y la lluvia ácida. Consecuentemente, la recuperación del nitrógeno presente en las aguas residuales para producir proteínas a través de la agricultura o medios de cultivo microbiológico, es posiblemente el mejor modo de evitar la permanencia de dichos contaminantes en la atmósfera (Matassa *et al.*, 2015).

También es posible producir polímeros como los polihidroxicanoatos (PHA), los cuales son biopoliésteres con propiedades similares a los plásticos convencionales, que son sintetizados por algunos microorganismos y almacenados en el citoplasma en forma de gránulos (**Figura 4**); y exopolisacáridos como los alginatos. Inclusive, se pueden recuperar fibras como la celulosa. Sin embargo, la cantidad de carbono y nitrógeno así obtenidos es pequeña, por lo que deben ser parte de una estrategia de recuperación más general (Puyol *et al.*, 2020).

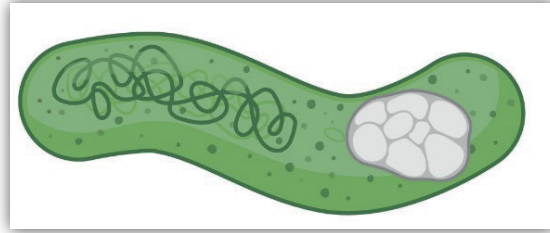


Figura 4. Inclusiones de PHA en una célula bacteriana, representadas por las esferas grises

A través del proceso de la digestión anaerobia también es posible obtener energía en forma de metano. Además, si se acopla un proceso de sulfato-reducción, es posible obtener azufre y recuperar metales pesados provenientes de la extracción y purificación de minerales (Puyol *et al.*, 2017).

Procesos empleados en la recuperación de recursos

1.- Tratamientos anaerobios

Este concepto utiliza sistemas basados en microorganismos que aprovechan los contaminantes en el agua bajo condiciones de ausencia de oxígeno, para producir distintos subproductos de valor. En este tipo de sistemas, el carbono presente en las aguas residuales es biotransformado casi en su totalidad en metano, generando menos lodos (biomasa). De esta manera, se produce un bioenergético que permite reducir los costos de operación, asegurando la producción de energía en la PTAR. Un ejemplo exitoso de este tipo de tratamientos es el reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). Sin embargo, para conseguir también la recuperación de nutrientes es necesario acoplar otro proceso como, por ejemplo, la precipitación química (REMTAVARES, 2017).

2.- Separación de caudales

Para conseguir transformar las PTAR

convencionales en biofábricas es conveniente separar las diferentes corrientes de aguas residuales que se generan en un hogar. Generalmente se propone separar las corrientes de **aguas grises** provenientes de la cocina, lavadora y ducha, las cuales son más diluidas y, por el otro, **las aguas negras** que provienen de los sanitarios y son más concentradas. De esta manera, las aguas grises se pueden utilizar para la producción de agua tratada de buena calidad que pueda reusarse, mientras que la corriente de aguas negras se puede llevar a un sistema de tratamiento biológico anaerobio para producir energía en forma de biogás (metano), o la recuperación de nutrientes (Puyol *et al.*, 2020).

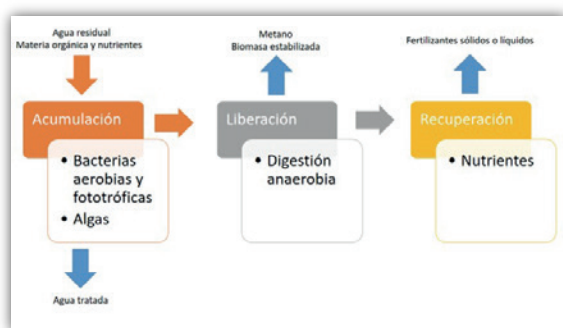


Figura 5. Concepto de acumulación-liberación-recuperación para el tratamiento de aguas residuales (Fuente: Puyol et al., 2020)

3.- Acumulación-liberación-recuperación
Bajo este proceso, se utilizan microorganismos que son capaces de acumular y transformar la materia orgánica y los nutrientes presentes en el agua residual. Luego, la biomasa microbiana es sometida a un tratamiento de digestión anaerobia. Así, es posible obtener otros recursos valiosos como agua tratada que se puede reutilizar; biomasa estabilizada que sirve como enmiendas o abonos para suelos y fertilizantes en estado líquido o sólido que contienen nitrógeno, fósforo y potasio

(Puyol *et al.*, 2020). Este esquema se conoce como acumulación-liberación-recuperación y se ilustra en la **Figura 5**.

Conclusión

A pesar de que el agua es un recurso fundamental para la vida e indispensable para el bienestar y el desarrollo socioeconómico de la humanidad, su disponibilidad es cada vez menor debido al aumento en la población mundial, las exigencias comerciales por su uso y la contaminación proveniente de diversas fuentes. México no es ajeno a esta problemática pues, en la actualidad, atraviesa por una crisis derivada de la escasez de este recurso; ocasionada por el mal manejo de los recursos hídricos que, aunado al cambio climático, dificultan el acceso a la población a fuentes seguras de agua potable y a sistemas de saneamiento confiables. Así, es común utilizar las aguas residuales crudas para regar cultivos, lo que representa una mala práctica que conlleva serios problemas de contaminación y graves riesgos a la salud pública. Como alternativa, se ha planteado el uso de las aguas tratadas, las cuales se pueden emplear para riego o en algunos usos industriales que no requieren agua potable. Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías en el tratamiento de las aguas residuales ha permitido que se creen nuevos conceptos y soluciones, logrando la reducción en el consumo de energía y productos químicos, algunos de ellos nocivos, en estas instalaciones, además de la recuperación de recursos valiosos, tales como energía en forma de metano, nutrientes que pueden ser utilizados como fertilizantes y otros productos de valor agregado como fermentados, biopolímeros y exopolisacáridos. De esta manera, las plantas de tratamiento convencionales se transforman en biofábricas, las cuales son operadas bajo un concepto de susten-

tabilidad, lo cual es particularmente relevante en países como México, donde, la cobertura de saneamiento es insuficiente.

Referencias

Ahmed W., Angel N., Edson J., Bibby K., Bivins A., O'Brien J.W., Choi P.M., Kitajima M., Simpson S.L., Li J., Tscharke B., Verhagen R., Smith W.J.M., Zaugg J., Dierens L., Hugenholtz P., Thomas K.V., Mueller J.F.(2020) First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: a proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. *Sci. Total Environ.* 728:138764

CONAGUA (2018). *Estadísticas del agua en México*. CONAGUA: México.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin A. (2002) Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4: 85-104.

INEGI (2019). *Agua potable y drenaje*. Cuéntame de México. <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>

Manahan S., E. (2017) *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers. Séptima Edición. Estados Unidos de América. ISBN 1-56670-492-8.

Matassa, S., Batstone, D. J., Hu Lsen, T., Schnoor, J., and Verstraete, W. (2015). Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world? *Environ. Sci. Technol.* 49, 5247–5254.

Metcalf & Eddy (2014). *Ingeniería de*

aguas residuales. Tratamiento y reutilización. McGraw Hill: México.

Noyola, A. y Mazari, M. (2018), Problemática y política del agua. En: Merino, L. y Velázquez, A. *Agenda Ambiental 2018. Diagnóstico y propuestas*. UNAM: México.

ONU (2019). *Informe de los Objetivos del Desarrollo Sostenible 2019*. ONU: Estados Unidos.

ONU (2020). *Informe mundial 2020 de la ONU sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. ONU: Estados Unidos.

Puyol, D., Batstone, D.J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., and Krömer, J.O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*. 7:2106.

Puyol, D., Monsalvo, V.M., Marina, E., Rogalla F., Meleroa, J.A., Martínez, F., Hülsen, T. y Batstone, D.J. (2020). Purple phototrophic bacteria as a platform to create the next generation of wastewater treatment plants: Energy and resource recovery. En: Olivares, J.A., Puyol, D., Melero, J.A. y Dufour J. *Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Biofuels*. Elsevier: Países Bajos.

REMTAVARES (2017). La Estación Depuradora de Aguas Residuales del siglo XXI. *madri+d*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales-del-siglo-xxi>.