An aerial photograph of a rugged, rocky landscape. A river flows through the center, surrounded by dark, jagged rock formations. A large, vibrant green area, possibly a forest or a large field, is visible in the lower right quadrant. The overall scene is dramatic and natural.

¿Qué son los tratamientos descentralizados y por qué pueden ser una solución a la gestión hídrica en la Ciudad de México?

Ing. Dulce Alejandra Zaragoza Ayala
Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez
Dr. Ulises Rojas Zamora
Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

Resumen

Las condiciones de sequía se han intensificado en diversos estados del país en los últimos años, causando problemas graves de escasez de agua que derivan en el racionamiento del recurso, generando situaciones que disminuyen el nivel de vida de las comunidades afectadas. La Ciudad de México no está exenta de esta situación, pues su principal fuente de abastecimiento de agua, los acuíferos, están sobreexplotados. ¿Qué podemos hacer para que la situación del agua no se agrave en nuestra ciudad? La respuesta está en la gestión hídrica integral que, además de considerar el manejo racional de las fuentes de abastecimiento, debe incluir el tratamiento de las aguas residuales y el reúso de las aguas tratadas. Es así como en este artículo se analiza el panorama de la gestión de los recursos hídricos en la capital y cómo el tratamiento descentralizado representa una opción sostenible para el manejo y aprovechamiento de las aguas residuales y la reducción del estrés hídrico en la entidad.

Abstract

Drought conditions have intensified in various states of the country in recent years, causing severe problems of water scarcity that lead to the rationing of the resource, generating situations that lower the standard of living of the affected communities. Mexico City is not exempt from this situation as its primary source of water supply, the aquifers, are overexploited. What can we do so our city's water situation does not worsen? The answer lies in comprehensive water management that, in addition to considering the rational management of supply sources, must include treating wastewater and reusing treated water. Therefore, this article analyzes the panorama of water resources management in the capital and how decentralized treat-

ment represents a sustainable option for managing wastewater and reducing water stress in the entity.

Palabras claves: Gestión descentralizada, Recursos hídricos, Saneamiento, Tratamiento de aguas residuales

Keywords: Decentralized management, Sanitation, Water resources, Wastewater treatment

¿Cuál es el panorama de los recursos hídricos en la Ciudad de México?

Aunque el 90% de los habitantes del país cuentan con acceso a agua potable, cerca del 30% sufren por el suministro del recurso en calidad y cantidad insuficiente. Peor aún, se espera que esta situación se agrave pues, según estimaciones para el 2030, la oferta de agua potable en México será solo de 68,300 MMm³; sin embargo, la demanda será de 91,200 MMm³, dejando un déficit del 25% (Monroy, 2021).

Al ser más alta la demanda de agua potable con respecto a la oferta, surgen problemas de presión sobre el recurso, causados también por la baja calidad del agua que impide su uso para consumo humano, haciendo que la oferta disminuya aún más. Otro factor que influye es la distribución desigual de los habitantes y de las fuentes de abastecimiento de agua en el país: el centro, norte y noroeste concentran el 77% de la población y cuentan con el 33% de agua disponible, en contraste con el sureste que tiene un porcentaje menor de población (23%) y una mayor porción de agua disponible (67%) (SEMARNAT, 2016).

Esta problemática se ve exacerbada especialmente en ciudades con gran cantidad de habitantes, como la Ciudad de México, la cual es la segunda entidad con más ha-

bitantes y la primera con mayor densidad poblacional en el país. En el último censo realizado por el INEGI, se contabilizaron un total de 9'209,944 de habitantes, con un crecimiento absoluto de 358,864 residentes del año 2010 al 2020 (INEGI, 2020), colocándola como la quinta ciudad más poblada del mundo. El crecimiento poblacional que la CDMX ha experimentado en las últimas décadas contribuye al progresivo agotamiento de sus fuentes de agua potable y al deterioro en su calidad, produciendo problemas de disponibilidad, con modelos de gestión desiguales entre grupos de la población.

Por ejemplo, en la Tabla 1 se puede observar que el porcentaje de viviendas sin abastecimiento de agua entubada dentro de la misma y cuya fuente de obten-

ción es del servicio público va del 0.88% al 49.50%. Resaltadas en color verde, se muestran las alcaldías con mayor déficit del servicio de abastecimiento de agua, las cuales son también las que tienen los índices de desarrollo económico más bajos (INEGI, 2020).

La baja disponibilidad de agua potable en las alcaldías señaladas se debe a diversos factores: uno de ellos es que los sistemas Cutzamala y Lerma, que son una importante fuente de abastecimiento, actualmente operan al 60 y 77% de su capacidad instalada, respectivamente (CONAGUA, 2018). Esto se debe a la variación en la precipitación, las extracciones clandestinas desde las conducciones, los cambios en la demanda, la existencia de pozos suspendidos por mala calidad del agua, agrie-

Demarcación territorial	Viviendas particulares habitadas	Ocupantes	Porcentaje de viviendas sin disponibilidad de agua entubada dentro de la vivienda cuya fuente de obtención es el servicio público	Índice de desarrollo económico
Total	2'756,319	9'159,392	11.14	0.40
Álvaro Obregón	219,354	757,117	5.38	0.49
Azcapotzalco	134,168	431,347	7.01	0.49
Benito Juárez	176,053	432,259	0.88	0.58
Coyoacán	191,517	612,130	4.61	0.49
Cuajimalpa de Morelos	60,436	217,606	13.70	0.45
Cuauhtémoc	196,466	540,976	2.21	0.55
Gustavo A. Madero	340,155	1,162,914	8.08	0.33
Iztacalco	117,720	403,805	6.91	0.42
Iztapalapa	504,365	1,820,809	14.27	0.33
La Magdalena Contreras	68,089	246,785	13.54	0.3
Miguel Hidalgo	146,762	412,529	3.76	0.59
Milpa Alta	39,100	152,682	49.50	0.21
Tláhuac	106,935	391,967	22.07	0.26
Tlalpan	202,318	695,308	25.93	0.26
Venustiano Carranza	135,768	443,120	4.19	0.38
Xochimilco	117,113	438,038	33.67	0.29

Tabla 1. Servicios de abastecimiento de agua potable por número de viviendas particulares habitadas y Demarcación territorial e Índice de desarrollo económico (INEGI, 2020).

tamientos y hundimientos del terreno por extracción intensiva del agua y, sumado a esto, destacan los altos costos de operación y mantenimiento que estos demandan (Escolero et al., 2016).

Además, se estima que aproximadamente un 40% del agua se pierde por fugas en la red de distribución de agua potable (Monroy, 2021). Estos sistemas llevan el recurso inicialmente por la zona poniente, dificultando su disponibilidad en la zona oriente y sur, teniendo como consecuencia que las personas que allí viven reciban una menor cantidad de agua, generando problemas graves de escasez (CONAGUA, 2020).

Otra importante fuente de abastecimiento está constituida por los pozos de agua subterránea, los cuales suministran más de un 60% del agua en la CDMX. Sin embargo, la extracción de agua es el doble de lo que se recarga de manera natural; de esta manera, muchos de estos pozos no se encuentran en buenas condiciones. Usualmente, el agua extraída de dichos pozos es potabilizada y repartida entre las distintas alcaldías, pero frecuentemente la presión es insuficiente y se suspende el servicio, tratando de solucionar el desabasto por medio de pipas (Montero, 2020).

Datos del censo de población publicados por el INEGI (2020) muestran que, del total de viviendas particulares habitadas en la CDMX, en 40,685 la única fuente de abastecimiento provenía de pipas. Además, están las viviendas que reciben agua por tandeo, método por el cual se suministra el recurso a tasas muy bajas y no de forma continua, de manera que no se satisfacen adecuadamente las demandas particulares de los hogares, los cuales se ven forzados a implementar agua de pipas como fuente alternativa.

El abastecimiento de agua por medio de pipas trae muchos problemas de diversa índole que impactan negativamente la calidad de vida de la población. Por un lado, no se tienen horarios definidos de abastecimiento, afectando a los habitantes que necesitan este servicio, especialmente a las mujeres, las cuales son el grupo principal que se encarga del suministro de agua (Montero, 2020) y por otro, los altos precios ocasionados por situaciones de corrupción, caracterizadas por la imposición de una cuota para recibir el recurso. Para empeorar las cosas, la calidad de agua se puede ver afectada adversamente cuando los habitantes no cuentan con una cisterna o tinaco adecuados para almacenar el agua y deben usar tambos y cubetas que no son herméticos (Gómez y Palerm, 2015).

Otro factor que afecta negativamente la calidad y cantidad de agua potable disponible es el bajo nivel de tratamiento que reciben las aguas residuales, las cuales muchas veces son vertidas sin tratamiento en cuerpos de aguas naturales, muchos de los cuales constituyen fuentes de abastecimiento para la población. De este tema hablaremos a continuación.

¿Cómo se manejan las aguas residuales en la Ciudad de México?

En México se han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales con enfoque centralizado, caracterizados por el manejo de grandes volúmenes de agua en instalaciones de gran tamaño y complejidad. El mejor ejemplo de este tipo de sistemas es la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atotonilco, la cual está ubicada en el Valle de Mezquital, Hidalgo y es una de las más grandes del mundo.

Según datos del Banco Mundial, la PTAR de Atotonilco atiende a 10.5 millones de

personas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM) y 700,000 habitantes del Valle del Mezquital en Hidalgo. Ocupa un área de 160 hectáreas, con una capacidad promedio de 35,000 L/s y una capacidad máxima de 50,000 L/s. El agua tratada obtenida se usa para irrigar alrededor de 90,000 hectáreas en el Valle del Mezquital, el mayor distrito de riego en México y uno de los más grandes de América Latina.

Las PTAR centralizadas involucran diversos procesos y operaciones unitarias para realizar el tratamiento de las aguas residuales. En términos generales, los procesos empleados son de tipo físico, químico y biológico que, a su vez, pueden combinarse entre sí; como ejemplo, un esquema de tratamiento puede incluir unidades de sedimentación primaria, reactores biológicos, sedimentación secundaria y desinfección (CONAGUA, 2015). La PTAR de Atotonilco está diseñada para operar con dos tipos diferentes de tratamiento: por un lado, un tren de procesos fisicoquímicos basados en un tratamiento químico con coagulantes para depurar las aguas de lluvia y, por el otro, un tratamiento biológico con lodos activados de alta tasa para tratar las aguas residuales municipales que llegan de la ZMVM.

Aunque bajo este enfoque centralizado el país ha aumentado su capacidad de tratamiento de aguas residuales, lo cierto es que, durante 2021, las 2,872 PTAR instaladas en el país trataron sólo el 67% de las aguas residuales recolectadas a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2021). Este valor es más bajo que la media nacional en saneamiento básico alcanzada en países como Argentina y Chile, los cuales tienen coberturas mayores al 80% (Noyola et al., 2013).

En la CDMX la situación es peor que el promedio nacional, pues en 2020 las PTAR

instaladas tenían una capacidad de tratamiento de 5.6 m³/s, pero únicamente trataron 2.4 m³/s, es decir, operaban al 43% de su capacidad (CONAGUA, 2020). Según la SEDEMA, para 2016 existían 271 PTAR, siendo la alcaldía Azcapotzalco la que tiene el mayor número (39). Las PTAR de la CDMX se encuentran, en su mayoría, en el norte, poniente y centro de la ciudad, donde se concentra la mayor actividad económica. Por el contrario, la alcaldía Milpa Alta, que se ubica al suroeste, solo cuenta con una.

La gestión adecuada de las aguas residuales se dificulta en la CDMX debido a que las alcaldías con menor disponibilidad de agua entubada y con menores índices de desarrollo económico son las mismas que tienen menor cobertura de PTAR, o aquellas en las que no existe reporte de la operación de estas o bien, cuentan con una infraestructura obsoleta debido al deficiente mantenimiento y falta de inversión (SEDEMA, 2015).

¿Qué son los tratamientos descentralizados?

Para aumentar el porcentaje de aguas residuales tratadas y, consecuentemente, su reúso en la CDMX, es necesario adoptar un nuevo enfoque, con soluciones que, además de abordar aspectos técnicos y económicos, cuiden la aceptación social, reduzcan el impacto al ambiente y adopten estrategias innovadoras que fomenten e incluyan el reúso de las aguas tratadas, ya que estas pueden servir como fuente alternativa de abastecimiento en usos que no requieren agua potable como, por ejemplo, el riego de parques y jardines o el combate a incendios, constituyendo así una opción para disminuir la brecha entre la disponibilidad del recurso y su demanda.

Así, la idea de implementar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas

residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés), resulta ser una alternativa de solución sustentable para la CDMX pues, además de reducir el impacto negativo al medio ambiente y la salud, mejora la gestión de los recursos hídricos (De Anda, 2017).

El concepto de sistemas descentralizados no es nuevo; sin embargo, en la última década ha ganado importancia (Noyola, 2013). Como ejemplo, en Australia alrededor del 12% de la población usa el enfoque descentralizado para la gestión de sus AR, mientras que en Estados Unidos ese porcentaje asciende al 18% (Nasr y Mikhaeil, 2015). Aunque en México no existen estadísticas concretas sobre el uso de sistemas descentralizados, el porcentaje de PTAR que poseen tecnologías de tratamiento empleadas comúnmente en el enfoque descentralizado es menor al 30%, por lo que hay un gran campo de oportunidad para su implementación.

Los sistemas descentralizados se diseñan para operar a pequeña escala y se basan en un conjunto de principios: son tecnologías sencillas y robustas que prescinden de operaciones y mantenimiento costosos y sofisticados, toleran fluctuaciones en el caudal y el tratamiento y reutilización se realizan en el mismo lugar donde se producen las aguas residuales, adaptándose al sitio de implementación.

De acuerdo con De Anda, (2017) el enfoque descentralizado genera múltiples beneficios, tanto técnicos, sociales, económicos y ambientales, algunos de estos se enlistan a continuación:

Al ser sistemas simples, la mayoría de sus partes funcionan sin una fuente de energía externa, y tienen la ventaja que pueden conectarse a las redes de alcanta-

rillado, o ser fácilmente desactivados, además de que comúnmente son operados por mano de obra poco calificada, incluso por las mismas comunidades o usuarios.

El enfoque descentralizado, al tener como premisa ubicar las tecnologías cerca del punto de generación, supera problemas asociados con las condiciones topográficas. Además, la recolección y transporte se simplifican disminuyendo o evitando el bombeo, ya que se utilizan redes de alcantarillado de longitudes cortas, sencillas y adaptadas al sitio, que conllevan una disminución de costos.

Con una adecuada selección y operación de las unidades de tratamiento se pueden alcanzar los objetivos de calidad del agua tratada y obtener valiosos recursos tales como biogás y nutrientes, que contribuyen a generar ingresos. De esta manera, es posible insertar a los sistemas descentralizados en un modelo de Economía Circular, mediante el cual el agua residual es aprovechada, convirtiéndola en productos renovables con valor añadido como agua reutilizable, energía y fertilizantes. Esto es especialmente importante en la actualidad, cuando constantemente crecen la demanda de materias primas y energía a la par de la escasez de recursos.

Ambientalmente, las aguas tratadas en sistemas descentralizados benefician a los ecosistemas pues es posible cumplir con la calidad requerida por las normatividades vigentes, disminuyendo la presión sobre las fuentes de abastecimiento, fomentando el reciclaje de agua y la reutilización de nutrientes.

Socialmente, al tener como punto focal el sitio de generación, se invierte el esquema convencional donde la planificación va desde los

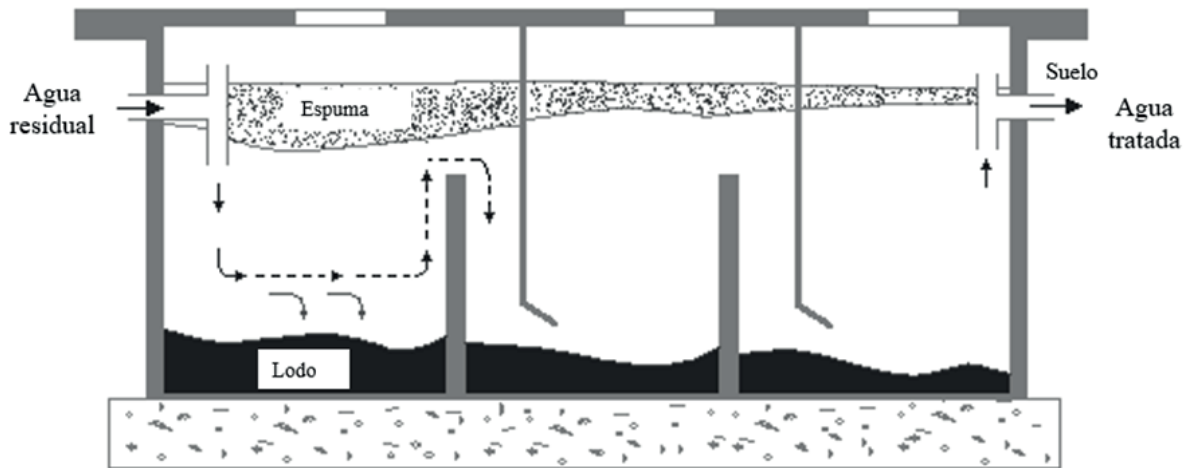


Figura 1. Esquema de un tanque séptico de tres cámaras

gobiernos hacia los usuarios y se promueve que cada comunidad tenga voz en el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas (Caicedo, 2014). Y cuando las personas conocen y ejercen sus derechos al participar en las decisiones que les afectan, pueden ayudar a asegurar que esas decisiones se respeten y se adapten a su necesidad de seguridad hídrica.

Entre las tecnologías más populares en el enfoque descentralizado se encuentran los humedales artificiales, los tanques sépticos y el reactor UASB. Estos sistemas de tratamiento descentralizado recientemente han ganado notoriedad debido a sus múltiples ventajas tales como la posibilidad de recuperación de recursos, su simplicidad de construcción y sus bajos costos de inversión y mantenimiento.

Las fosas o tanques sépticos (Figura 1) tienen una larga historia en el tratamiento descentralizado por su estructura simple, compacta, robusta y su facilidad de operación y mantenimiento (Fan et al., 2017), así como sus bajos costos debido a una nula demanda de energía eléctrica en su funcionamiento. Son cámaras impermeables donde se desarrollan procesos de sedimentación, almacenamiento y digestión de sólidos. En

principio, el influente fluye por gravedad desde la fuente hasta el sistema. Una vez en el interior, el agua circula lentamente para permitir que los contaminantes se sedimenten y acumulen en el fondo, siendo estabilizados mediante digestión anaerobia y convirtiéndolos en productos más simples como el metano, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía (CONAGUA, 2015). De acuerdo con la CONAGUA, en 2020 existían en México 144 tanques sépticos y 62 tanques Imhoff, constituyendo alrededor de un 7% de las PTAR instaladas en el país.

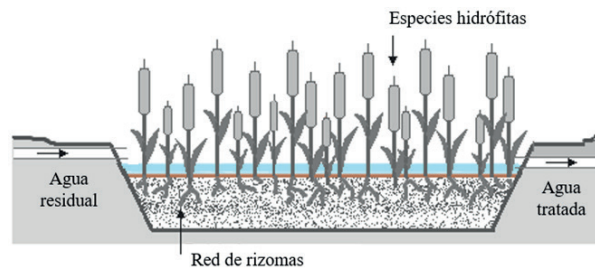


Figura 2. Esquema de un humedal artificial

Los humedales artificiales (Figura 2) son sistemas de tratamiento que imitan procesos de purificación naturales. Consisten de un estanque o canal poco profundo, en el cual se siembran plantas acuáticas, como por ejemplo la especie *Phragmites australis* (comúnmente llamada carrizo).

Normalmente son instalados en zonas rurales y periurbanas a causa de la extensión de terreno que requieren (De Anda, 2017).

El tratamiento en los humedales ocurre cuando estas plantas almacenan y liberan agua en sus tejidos, realizando un proceso de filtración, absorbiendo nutrientes, permitiendo la degradación biológica de contaminantes y materia orgánica por microorganismos. A su vez, las raíces de estas plantas también funcionan como hábitat para los microorganismos, permitiendo la formación de una biopelícula que contribuye de forma significativa a la remoción de contaminantes (Valencia et al., 2010). En el país hay instalados 230 humedales, que equivalen al 8% de las PTAR a nivel nacional.

Finalmente, **los reactores de lecho anaerobio de flujo ascendente** -UASB, por sus siglas en inglés- (Figura 3) han ganado popularidad, especialmente en América Latina, debido a la necesidad de resolver su problemática sanitaria con tecnologías eficientes, de costos accesibles y viables para la protección del ambiente. En México existen 364 reactores de este tipo, conformando el 13% de las PTAR instaladas. Por ser un proceso anaerobio, es decir, que ocurre en ausencia de oxígeno, el reactor UASB produce biogás (metano), aprovechable como energía.

En el reactor UASB el influente es alimentado por el fondo del mismo, desde donde fluye a través de un denso lecho de lodos anaerobios con buenas características de sedimentación. Aquí es donde se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica a biogás. En su parte superior se ubica un separador trifásico, donde el biogás producido por los microorganismos anaerobios y el lodo flotante son separados del efluente.

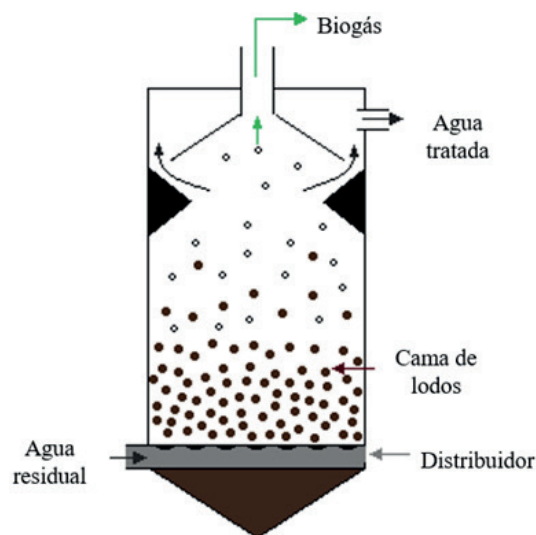


Figura 3. Esquema de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

La Tabla 2 presenta de manera sintetizada las ventajas y desventajas técnicas de los sistemas anteriormente mencionados, mostrando que la implementación exitosa de cualquiera de estas tecnologías depende del análisis cuidadoso de las condiciones particulares del lugar donde se desea instalar.

No obstante, existen varios obstáculos de orden gubernamental que deben ser superados para que este enfoque pueda ser exitoso. Uno de los más importantes es la falta de incentivos económicos y programas gubernamentales para los proyectos de saneamiento descentralizado en las comunidades, así como para el reúso de las aguas tratadas (de Anda, 2017).

Es importante recalcar que el reúso de las aguas tratadas puede aumentar la sustentabilidad de las comunidades al disminuir las extracciones de agua de fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas. Además, la creciente escasez de agua puede, en sí misma, ser un incentivo para reutilizar las aguas tratadas.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Tanque séptico	<ul style="list-style-type: none"> • Presentan bajos costos de construcción • Prescinden de sofisticada mano de obra y mantenimiento • No requieren de mantenimiento frecuente ni de energía para operar • La cantidad de lodo producido durante su operación es mínima 	<ul style="list-style-type: none"> • No son sistemas apropiados cuando el suelo no es permeable y se encuentra en zonas propensas a inundaciones • Los porcentajes de remoción de DQO y nutrientes son bajos, se encuentran el rango de 30-60%
Humedales artificiales	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos de instalación, operación y mantenimiento • No requieren energía externa para su operación ni desprenden olores desagradables • Sobresalen por la generación de paisajes agradables • Eficiencias de remoción de DQO de entre 20-93%, con un promedio de 70% • Además de remover DQO y DBO, eliminan nitrógeno, fósforo y metales pesados 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren de procesos adicionales de desinfección para eliminar en su totalidad organismos patógenos • En zonas de altitud elevada puede ocurrir que las plantas empleadas no se adapten • Con altas concentraciones de materia orgánica y sólidos son necesarios tratamientos previos
Reactor UASB	<ul style="list-style-type: none"> • El biogás producido por el sistema es un subproducto valioso • El requerimiento de energía eléctrica es bajo ya que no se requiere de una aireación • Soportan periodos sin alimentación (semanas e inclusive meses) • Bajos requerimientos de espacio para su instalación debido a que operan a altas cargas volumétricas • Construcción simple y económica, al no requerir equipos sofisticados • Las eficiencias de remoción de DQO en los reactores UASB van del 60-80% • Producción de biomasa baja 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación incompleta de patógenos • La calidad del efluente es menor con respecto a los sistemas con proceso aerobio • Suelen presentar olores desagradables debido al escape de gases y fallos en la ventilación o sobrecarga • Requieren de periodos prolongados de arranque derivados de la poca producción de biomasa • Son más sensibles a condiciones ambientales y presencia de sustancias tóxicas y • Pueden producir gases corrosivos

Tabla 2. Comparación de las ventajas y desventajas del tanque séptico, los humedales artificiales y el reactor UASB.

Otro obstáculo que debe ser vencido es la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales a partir de sistemas descentralizados, pues las tecnologías convencionales dominan en el mercado lo que, junto con la falta de conocimiento en alternativas

de saneamiento descentralizado, deriva en una selección inadecuada y, por consiguiente, en el fracaso de los proyectos. Por eso es muy importante dar difusión a este tipo de tecnologías a través de artículos de divulgación como este.

Conclusiones

El panorama de los recursos hídricos en la Ciudad de México es complejo debido a que la principal fuente de abastecimiento, los acuíferos, están sobreexplotados. Esta situación es agravada por el crecimiento poblacional que, con el consecuente aumento de la carpeta asfáltica, impide la recarga natural de los pozos. A estos se suma que la cobertura de saneamiento es baja con respecto al promedio nacional, inclusive con la instalación de grandes PTAR con enfoque centralizado como la de Atotonilco. Por tanto, son necesarias soluciones innovadoras para gestionar de manera integral los recursos hídricos en la ciudad.

Es así como el uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales bajo el enfoque descentralizado puede ser una alternativa. Estos sistemas se caracterizan por ser tecnologías sencillas y robustas, de bajo costo que ofrecen la posibilidad de reúso del agua tratada en el mismo lugar donde se producen las aguas residuales, adaptándose al sitio de implementación y mitigando la escasez del agua, sobre todo en usos que no requieren agua potable. Algunos sistemas de tratamiento comúnmente utilizados en el enfoque descentralizado, como los tanques sépticos, los humedales y los reactores UASB, ya son aplicados en otras partes del país con resultados promisorios, por lo que la implementación de estas tecnologías en la ciudad podría resultar muy positiva.

Sin embargo, para que dicha implementación sea exitosa se requiere de la participación de los diferentes niveles de gobierno junto con las comunidades para crear programas que impulsen su instalación y el reúso de las aguas tratadas.

Referencias

1. Caicedo, J. (2014). *Aspectos claves para*

la selección de esquemas descentralizados en el manejo de aguas residuales municipales en Colombia. [Tesis de licenciatura en ingeniería sanitaria: Universidad del Valle]. Biblioteca digital de la Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co>.

2. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. CONAGUA. México.

3. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*. CONAGUA. México.

4. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. SEMARNAT/CONAGUA. México.

5. de Anda, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14, 119–143.

6. Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409–427. DOI: 10.18268/BSGM2016v68n3a3.

7. Fan, B., Hongliang, W., Zhang, Y., & Hu, M. (2017). Application and development of septic tank technology in decentralized wastewater treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 11(3), 1314–1321. DOI: 10.12030/j.cjee.201511112.

8. Gómez, M., & Palerm, J. (2015). Abastecimiento de agua potable por pipas en

- el Valle de Texcoco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(4), 567–586.
9. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población en México 2020*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
10. Monroy, O. (2021). *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua*. ANUIES. México.
11. Montero, D. (2020). El abastecimiento de agua en Iztapalapa: Un análisis institucional. *Revista de Economía Institucional*, 22(43), 301–321. DOI: 10.18601/01245996.v22n43.
12. Nasr, F., & Mikhaeil, B. (2015). Treatment of domestic wastewater using modified septic tank. *Desalination and Water Treatment*, 56, 2073–2081.
13. Noyola, A., Morgan, J., & Güereca, L. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas*. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
14. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. SEMARNAT. México.
15. Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2016). *Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. SEDEMA. México.
16. Valencia, E., Silva, I., & Narváez, C. (2010). Sistemas Descentralizados Integrados y Sostenibles para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas. *Revista Ingeniería y Región*, 7, 66–72