





## Tratamiento biológico de aguas residuales con perspectiva de economía circular Biological wastewater treatment with a circular economy perspective

U. Núñez-García <sup>a</sup>, H. I. Navarro-Gómez <sup>b\*</sup>, M. R. González-Sandoval <sup>b</sup>, J. Flores-Badillo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Alumno de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.  
<sup>b</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

En la actualidad, en México, un gran porcentaje de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se encuentran abandonadas o bien, trabajando en condiciones precarias debido a los altos costos de mantenimiento, energía y operación. En años recientes, se implementaron nuevas tecnologías en los tratamientos biológicos para recuperación de nutrientes, compostaje o mejoramiento de los suelos. A futuro se estima que la tendencia sea que una PTAR se convierta en una Planta de Proceso en donde se obtengan no solo un efluente con calidad del agua aceptable, sino que también se obtengan otros productos que permitan lograr incrementar su rentabilidad. Para el análisis de la viabilidad del cambio de PTAR convencional a una Planta de Proceso, se utilizó el sistema de valoración multicriterio y la metodología del marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales (MESMIS). Por lo antes mencionado se concluye que una Planta de Proceso tiene una mayor vida útil que una PTAR por factores económicos, sociales, ambientales y con una alta tasa de recuperación de la inversión.

**Palabras Clave:** Economía circular, tratamiento biológico, auto sostenible, proceso anaerobio, proceso aerobio

### Abstract

Currently, in Mexico, a substantial percentage of wastewater treatment plants (WWTP) abandoned or working in precarious conditions due to high maintenance, energy, and operation costs. In recent years, innovative technologies have implemented in biological treatments for nutrient recovery, composting, or soil improvement. In the future, it estimates that the trend is for a WWTP to become a Process Plant where not only an effluent with acceptable water quality obtained, but also other products obtained to increase profitability. For the analysis of the feasibility of switching from conventional WWTP to a Process Plant, the multi-criteria valuation system, and the methodology of the framework for the evaluation of natural resources management systems (MESMIS) used. Therefore, it deduces that a process plant has a longer service life than a WWTP due to economic, social, environmental factors and a high rate of recovery of investment.

**Keywords:** Circular economy, biological treatment, self-sustainable, anaerobic process, aerobic process.

### 1. Introducción

El agua residual, en general, es un recurso valioso a partir del cual pueden recuperarse agua limpia, energía, nutrientes e incluso minerales que pueden reinsertarse en el mercado (Banco Mundial, 2020).

No obstante, los países de América Latina, históricamente, han invertido más en el abastecimiento de agua potable que en el saneamiento de las aguas residuales tan solo tratan entre el 30 % y el 40 % del agua residual recolectada, lo que tiene un impacto negativo tanto en la salud humana como en el medioambiente (Banco Mundial, 2020).

Las aguas que no reciben tratamiento llegan eventualmente a ríos, a cuerpos de agua y a océanos, llevando contaminantes microbiológicos, químicos y materia orgánica que contiene fosfatos, así como una gran cantidad de nitrógeno, los cuales

favorecen el crecimiento de plantas acuáticas y algas, que acaban por reducir la concentración del oxígeno disuelto, provocando la eutrofización de los cuerpos de agua.

En este sentido, se ve al agua residual solo como un desecho y no como una oportunidad en la generación de recursos (Díaz Lázaro-Carrasco, 2021; Banco Mundial, 2020).

\*Autor para la correspondencia: [humberto\\_navarro@uaeh.edu.mx](mailto:humberto_navarro@uaeh.edu.mx)

**Correo electrónico:** [nu319121@uaeh.edu.mx](mailto:nu319121@uaeh.edu.mx) (Uriel Núñez-García), [humberto\\_navarro@uaeh.edu.mx](mailto:humberto_navarro@uaeh.edu.mx) (Humberto Iván Navarro-Gómez), [mrgonzalez@uaeh.edu.mx](mailto:mrgonzalez@uaeh.edu.mx) (María del Refugio González-Sandoval), [javier\\_flores11060@uaeh.edu.mx](mailto:javier_flores11060@uaeh.edu.mx) (Javier Flores Badillo).

Las PTAR contribuyen al mejoramiento del medio ambiente, al mejorar la calidad de agua que llega a un cuerpo receptor, así como al encontrar beneficios con la reutilización de estas aguas (ej., sustitución de fuentes de agua potable), generación de energía a partir del biogás (ej., mitigación y adaptación al cambio climático) y el uso de biosólidos como fertilizantes, ejemplo: sustitución de fertilizantes sintéticos (Banco Mundial, 2020).

Sin embargo, las tecnologías convencionales tienen elevados costos de construcción, operación y mantenimiento especialmente en zonas densamente urbanizadas siendo tres consecuencias ambientales comunes a estos sistemas: a) el consumo de recursos no renovables; b) la degradación ambiental asociada con la extracción y uso de biocombustibles fósiles, plásticos, concreto, reactivos químicos, etc.; c) el destino de grandes cantidades de subproductos resultantes (Kadlec y Wallace, 2009).

Es por ello que la Organización de las Naciones Unidas (ONU), busca contribuir, conforme a las normas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), al desarrollo económico y social de los países menos desarrollados a través del desembolso neto de créditos y donaciones que permitan la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en donde se impulse también la economía circular y una mejor eficiencia en la desinfección, así como de otro tipo de obras que contribuyan a mitigar la pobreza y el mejoramiento de la salud (ONU, 2021).

La infraestructura para la depuración de aguas municipales es compleja, necesitando de un gran capital de inicio para la construcción, el mantenimiento y su funcionamiento; por tanto, las fuentes de financiamiento para la operación y mantenimiento (Jhuesa Water Technology, 2021).

En México, de las 2,300 plantas de tratamiento de agua residual existentes, solo alrededor del 40 % se encuentra en funcionamiento debido, en gran medida, a que los tratamientos necesitan una gran cantidad de energía para bombeo, así como un alto costo para la propia operación y mantenimiento de las plantas depuradoras (Bigio, 2018).

Otros de los principales factores que contribuyen el abandono de las PTAR son la baja concientización de los daños a la salud que ocasiona un funcionamiento deficiente de la planta y la falta de visión del uso de éstas como una planta de procesamiento que permita obtener subproductos que, si puedan reutilizarse en el proceso o fuera de él y que coadyuven a obtener recursos para su autosostenibilidad, es decir, aplicar una perspectiva de economía circular.

Es por esta razón que las PTAR deben ser evaluadas bajo un análisis de ciclo de vida completo incluyendo aspectos económicos, ambientales, políticos y sociales (Rodríguez, 2018; ONU, 2023).

El abandono de las instalaciones también tiene como consecuencia la reducción de la plusvalía de los predios colindantes a ella, además de tener implicaciones ecológicas como la descarga de aguas sin tratamiento, que tendrán impactos adversos sobre el ecosistema, la economía, así como en la salud pública, formando basureros y alterando el paisaje de la zona.

Es cierto que, en la última década, se han desarrollado mejoras en los sistemas basados en procesos anaerobios avanzados tales como el reactor anaerobio de flujo ascendente y el filtro anaerobio de flujo ascendente. (Anda et al., 2010)

Estos sistemas ofrecen buenas oportunidades para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales industriales con contenidos medios y altos de carga orgánica, así como para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y municipales de baja carga orgánica (Anda et al., 2010).

Los sistemas convencionales siguen presentando hasta ahora las consecuencias ambientales antes citadas y la problemática con la eficiencia en la desinfección teniéndose que complementar con otros sistemas.

Otra alternativa que se ha estudiado es la utilización de sistemas naturales de tratamiento como son humedales construidos, lagunas de estabilización, etc. Sistemas que son muy prometedores en zonas rurales o semi rurales ya que son más simples de construir, tienen un bajo costo, su operación y mantenimiento no presenta complicaciones, tienen bajo consumo de energía de fuentes no renovables y una eficiencia considerada como buena en la remoción de contaminantes (Rodríguez-Rodríguez, 2019). Su desventaja es que requieren una superficie importante de terreno y cuyo costo en las zonas urbanizadas es una limitante.

Una combinación de sistemas anaerobios con sistemas facultativos y aerobios, tales como las lagunas de estabilización, biofiltros y humedales artificiales son muy viables, contribuyendo los sistemas no anaerobios a disminuir el costo de instalación, abatir el consumo energético y cumplir con los estándares de calidad en la descarga, generando espacios amigables con el entorno (Anda, 2010).

Un caso de éxito de esta combinación es el método para tratar aguas residuales basado en procesos anaerobios y humedales artificiales plantados con especies ornamentales desarrollado en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) (De Anda-Sánchez, 2017).

La investigación se enfocó en la comparación de distintos procesos biológicos y sus mejoras, las que suponen una contribución en la eficiencia y en la recuperación de recursos.

## 2. Procesos de tratamiento biológico de aguas residuales

Las aguas residuales son producto de la utilización de agua potable por el ser humano, para diferentes usos de la vida diaria, tanto en hogares como a nivel industrial, por lo que se altera su composición, convirtiéndose en agua contaminada, sin embargo, por medio del tratamiento de estas aguas es posible eliminar los contaminantes antes mencionados (Banco Mundial, 2020).

De acuerdo con su origen, las aguas residuales se pueden clasificar en 4 tipos (aunque estos luego puedan presentar sus propias categorías internas): aguas residuales domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, aguas residuales de la agricultura o la ganadería y, aguas residuales derivadas de la lluvia ácida (Arriols, 2018).

El tratamiento de las aguas residuales es la remoción de sustancias contaminantes a fin de evitar efectos negativos en la calidad de los cuerpos de agua receptores.

El tratamiento secundario es la etapa de remoción de la mayor parte de la carga orgánica contaminante, por lo que en esta investigación se optó por identificar los procesos de tratamiento biológico actuales, así como las nuevas tecnologías que se han implementado. Es decir, se abordaron los diferentes tipos de tratamientos más comúnmente utilizados, así como su funcionalidad y el beneficio que tiene

cada uno de ellos. Una vez que fueron identificadas las características de los procesos comúnmente utilizados en el mundo, especialmente en América Latina, se procedió a realizar una comparación de estas.

En la Tabla 1 se mencionan algunos de los principales procesos tanto aerobios como anaerobios mostrando su nombre común y aplicación.

La selección está basada en las capacidades de degradación de la materia orgánica de los microorganismos que utilizan oxígeno como receptor de electrones.

Tabla 1. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de agua residual.

Tipo	Nombre común	Aplicación
<b>Procesos aerobios</b>		
Cultivos en suspensión	<p><b>Procesos de lodos activados</b> Aireación graduada Contacto y estabilización Aireación prolongada</p> <p><b>Nitrificación de cultivos en suspensión</b> Lagunas aireadas Digestión aerobia Aire convencional Oxígeno puro</p>	<p><b>Eliminación de la DBO Carbonosa</b> (nitrificación).</p> <p><b>Nitrificación:</b> Eliminación de la DBO Carbonosa (nitrificación)</p> <p><b>Estabilización:</b> Eliminación de la DBO Carbonosa.</p>
Cultivo fijo	<b>Filtros percoladores</b> Baja carga Alta carga Reactores de lecho compacto	<b>Eliminación de la DBO carbonosa</b> (nitrificación)
Procesos combinados	<b>Biofiltros activados</b> Filtros percoladores con contacto de sólidos, procesos de fangos activados con biofiltros.	<b>Eliminación de la DBO carbonosa</b> (nitrificación)
Cultivo fijo	<b>Desnitrificación de película fija</b>	<b>Desnitrificación</b>
<b>Procesos anaerobios</b>		
Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia Baja carga, una etapa Alta carga, una etapa	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa
	Manto de fango anaerobio de flujo ascendente	Eliminación de la DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa, Estabilización de residuos (desnitrificación)
<b>Procesos anaerobios, anóxicos o aerobios combinados</b>		
Cultivo de suspensión	<b>Proceso de una o varias etapas,</b>	<b>Eliminación de DBO carbonosa,</b>

	múltiples procesos patentados.	nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo
Procesos combinados: Cultivo dijo y en suspensión.	<b>Procesos de una o varias etapas</b>	<b>Eliminación de la DBO carbonosa,</b> nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo.
Procesos en estanques	<b>Lagunas aerobias</b> Estanques maduración (terciarios) Estanques facultativos Estanques anaerobios	<b>Eliminación de la DBO carbonosa</b>

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

Esta característica permite a las células tener un rendimiento energético mucho más alto, así como aprovechar la capacidad de estos microorganismos, en donde se asimila materia orgánica y nutrientes que se disuelven en el agua residual para su crecimiento.

En la Tabla 2 se muestran ejemplos de PTAR que se encuentran en operación con sistemas de absorción, proceso de lodos activados y remoción de minerales como hierro y manganeso, considerados como los principales tipos de tratamientos biológicos que se encuentran en el mundo.

Tabla 2. Ejemplos de PTAR en operación de México y otras partes del mundo.

País	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Aplicación
Estados Unidos	Detroit	PTAR de Detroit	Proceso de lodos activados de oxígeno puro	La planta incorpora un proceso de lodos activados de oxígeno puro con tanques rectangulares cubiertos
Estados Unidos	Deer Island	PTAR de Deer Island	Tratamiento gravedad como un sistema de lodos activados por oxígeno	Sistema de lodos activados por oxígeno, manejado por 12 digestores de lodos de 140 pies y 90 pies de diámetro
México	Atotonilco	PTAR de Atotonilco	Sistema de cogeneración	Lodos generados a través de un proceso de digestión anaerobia, transformados em biogás (CO2 y metano) y lodos estabilizados
Asia	República Popular China	PTAR de Bailongga	Proceso anaerobio de digestores de lodos	El lodo seco se utiliza para aplicaciones no agrícolas. El biogás obtenido se utiliza para operar la planta de secado de lodos.

Fuente: Elaboración propia, tomando como base datos de Banco Mundial (2020).

### 3. Metodología para el análisis de los procesos biológicos y la posible implementación de la economía circular

En la preparación de este análisis se utilizó información sobre la evolución de los tratamientos y su posible combinación. La información necesaria para considerar algún modelo circular que se pudiera implementar se tomó de experiencias en otros países y de las bases del sistema de economía circular.

Los datos analizados y procesados se tomaron de fuentes oficiales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía (INEGI), a través de sus páginas web. Esta información se complementó y amplió con la información publicada en fuentes académicas (Zurita et al, 2011).

Esta comparación se realizó agrupando los diversos factores que pueden influir en la selección a través de un análisis multicriterio en donde uno de los tipos de valoración para cada factor fue la opinión de expertos.

Por otra parte, para cuidar parte de los aspectos que resultaron como principales a evaluar para un desarrollo conforme a los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS); en la valoración, se consideraron indicadores y co-indicadores de la Metodología MESMIS.

Por consiguiente, el análisis realizado fue del tipo multidisciplinario dentro del marco (MESMIS) para la evaluación de la sustentabilidad.

La metodología consistió en tres etapas en donde se diseñó el modelo para la interpretación del grado de sustentabilidad de los sistemas de vida, así como identificaron índices, subíndices e indicadores, con base en los atributos propuestos por el MESMIS (Astier et al, 2008).

El tema de indicadores ambientales ha sido abordado por diversas instituciones, con diferentes conceptos, objetivos y alcances, lo que ha producido confusión, sobre todo en los nuevos desarrolladores (SEMARNAT, 2005).

Y, debido a que la información utilizada para construir indicadores ambientales es amplia y diversa, se requiere un marco conceptual que permita estructurar la información y facilitar su acceso e interpretación. En este sentido, existen varios modelos para organizar los conjuntos de indicadores. (Indicadores-PAOT).

Uno de los más conocidos es el denominado Presión-Estado-Respuesta (PER) propuesto por Environment Canada y la OCDE (1993) y, retomados por Basurto (2021) en su artículo sobre la recuperación de energía y nutrientes desde un Digestor anaeróbico de biomasa agrícola. En la actualidad el Gobierno de Canadá, a través de Environment Canada (2023) mantiene la actualización de sus indicadores agregando nuevos a la lista original.

A continuación, se presenta una breve descripción del esquema PER, el cual permite obtener los resultados con ayuda de información secundaria y la opinión de expertos en el tema, de esa forma se establecieron los indicadores de sustentabilidad ambiental existentes para México (SEMARNAT, 2005)

Los indicadores de presión, estado y repuesta permiten evaluar, a través de diversas variables las actividades humanas y su influencia sobre la calidad ambiental y los recursos naturales, así como el estado de los recursos y los esfuerzos que realiza la sociedad sobre las instituciones o gobiernos

orientados a la reducción o mitigación de la degradación de los recursos hídricos.

Las variables se visualizan, finalmente, por medio de esquemas radiales, también llamados biogramas, en cuya área se expresa el nivel de sustentabilidad del sistema, para totalizarlo y expresarlo como un porcentaje (Sepúlveda, 2008)

### 4. Resultados

El Marco (MESMIS) se ha utilizado para evaluar la sustentabilidad de los sistemas productivos mediante su comprensión desde su integralidad la cual surge de las interrelaciones entre los procesos ambientales.

Por su versatilidad, esta metodología ha sido elegida para evaluar diversos sistemas de producción como son los sistemas agrícolas, pecuarios, forestales o bien, sistemas complejos como agroforestales o silvo-pastoriles (Astier et al, 2008) y, en este caso para la evaluación de Plantas de Tratamiento y la viabilidad de su utilización en la búsqueda de la economía circular.

El modelo de interpretación de la sustentabilidad de los sistemas de vida parte de lo propuesto por el modelo PER que señala tres elementos del “triángulo de equilibrio”, consideradas también como las tres etapas de la metodología propuesta, las cuales son 1) Presión, 2) Estado y 3) respuesta de las PTAR relacionado a los sistemas de vida.

Las zonas de vida se expresan a través del índice “funciones ambientales”, las unidades socioculturales a través del índice “alivio de la pobreza” y sus connotaciones sociales; y el elemento unificador que le da sentido a la identificación y caracterización de sistemas de vida, se expresa a través del índice de “sustentabilidad de sistemas productivos”.

Tabla 3. Enfoque Presión-Estado -Respuesta

Presión	Estado	Respuesta
Actividades humanas.	Estado del medio ambiente y de los recursos naturales.	Actores económicos y ambientales.
Uso del agua (demanda hídrica).	Caudal.	Aumento de las enfermedades relacionadas con el agua.
Frecuencia de uso de aguas negras.	Calidad del agua.	Mejora en la productividad o mejora de la tierra
Destino final de efluentes.	Cambios de vegetación.	(agricultura, silvicultura).
Manejo de lodos y aguas residuales.	El aumento de erosión en la cuenca.	Análisis físico químico de aguas y suelo.
	Interrupción de la presa en el río.	

Fuente: Elaboración propia con fundamento en el sistema de indicadores PER, tomado de SEMARNAT (2005).

En la Tabla 3 se muestra la estructura del modelo PER definido a partir de las variables relacionadas con el manejo y cuidado del recurso hídrico en sistemas productivos

Conforme a la metodología que plantea MESMIS, se ha llevado a cabo la caracterización del sistema o proceso de producción (en este caso de depuración del agua) seguida de la

identificación de sus puntos críticos a través metodologías participativas como la planteada por el esquema PER

De acuerdo con los puntos críticos y, conforme a las recomendaciones existentes se seleccionaron un conjunto de indicadores relativos a los atributos de sostenibilidad propuestos por MESMIS: Productividad, Estabilidad, Confiabilidad, Resiliencia, Adaptabilidad, Equidad y Autosuficiencia (Neri-Ramírez et al, 2013).

La información necesaria para estimar el valor de los indicadores se obtuvo mediante encuesta directa, opinión de expertos y gestión técnico-económica. "Posteriormente se relativizó el valor inicial de cada indicador con relación a un rango de referencia" (Neri-Ramírez et al, 2013).

Una vez elaborado el modelo de interpretación de la sustentabilidad de los sistemas de vida, se realizó un proceso para la medición de los 13 indicadores del MESMIS (6 ambientales, 4 económicos y 3 sociales). de este trabajo tiene que ajustarse a una serie de principios o atributos de los sistemas sustentables.

En el marco MESMIS un conjunto de indicadores medidos y monitoreados busca reflejar los atributos de sustentabilidad para un sistema socioambiental específico (Neri-Ramírez et al, 2013).

El conjunto de indicadores y sus formas de medición fueron determinados por la escala y el objetivo de la evaluación, además de los aspectos que debilitan o fortalecen la sustentabilidad, es decir, cada indicador corresponde a los atributos ambientales, económicos y sociales) utilizados en este estudio debían ajustarse a una serie de principios y atributos de los sistemas sostenibles (Mijangos-Pulido y De Anda-Sánchez, 2021)

El grupo de indicadores y sus medios de medición fueron determinados por la escala de evaluación y el objetivo, así como los aspectos que debilitan o fortalecen la sostenibilidad, es decir, cada indicador corresponde a atributos relacionados con: a) productividad, b) estabilidad, resiliencia y confiabilidad, c) adaptabilidad, d) equidad y e) autogestión (ver Tabla 4).

La selección de los indicadores se llevó a cabo por medio de un grupo de expertos los cuales determinaron que eran los más adecuados para el estudio de la sustentabilidad de una PTAR. Dicho ejercicio se hizo con la ayuda de un análisis multidisciplinario (MESMIS).

Tomando como base los indicadores que propone Neri-Noriega et al. (2008) para la sustentabilidad de sistemas agrícola con pequeña irrigación. En la Tabla 4 se muestran los indicadores, criterios de diagnóstico, así como los métodos que se ocuparon para evaluar la sustentabilidad de una PTAR y cómo repercute o beneficia por medio de un valor que se le asigna a través de la metodología de MESMIS.

Una vez obtenidos los valores de los 13 indicadores de las áreas de evaluación económica, ambiental y social, se integraron los resultados y así se pudo emitir un juicio de valor sobre los sistemas analizados respecto a su sustentabilidad.

### 5. Análisis de los Resultados

Después de analizar cada indicador individualmente, se procedió a la evaluación global de los sistemas por medio de la integración de los 13 indicadores, para conocer la situación actual de los sistemas comparados.

Tabla 4. Definición de valores óptimos y cálculo de valores ponderados de indicadores de sustentabilidad de una PTAR.

	Criterio de diagnóstico	Indicador	Método de medición	Instrumento	Área de evaluación	Valor
Productividad	Eficiencia	Volumen de extracción	Volumen de extracción (A)	REPDA	Ambiental	71
		Volumen de recarga	Volumen de recarga por lluvia (B)	CONAGUA	Ambiental	61
		Consumo de agua en agricultura	Volumen de agua destinada a riego (C)	CONAGUA	Económico	75
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Diversidad	Calidad química del agua	Nivel de contaminación de las aguas (D)	CENSO	Social	80
	Conservación de recursos	Cambio de suelo	Superficie agrícola cambiado a uso urbano (E)	CONAGUA	Ambiental	55
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Uso de energía eléctrica	Costo de reúso del agua	Precio por litro reutilizado (F)	Plan Nacional de Desarrollo	Económico	87
		Potencial hídrico	Precio por kWh <sup>-1</sup> (G)	CFE	Económico	91
Adaptabilidad	Evolución de la PTAR	Disponibilidad	Volumen de agua disponible	CONAGUA	Ambiental	81
		Evolución del nivel estático	Medición del nivel de agua en el acuífero (I)	CONAGUA	Ambiental	85
Equidad	Distribución del agua	Consumo per cápita	Consumo de agua por habitante (J)	UNESCO	Económico	85
Autogestión	Generación de recursos	Valor económico del agua	Costo de 1 m <sup>3</sup> de agua (K)	CRE	Económico	92
		Participación social en toma de decisiones	Porcentaje de usuarios participando	COTAS	Social	59
		Índice de desarrollo humano	Grado de incremento de bienes para mejora de vida	CONAGUA	Social	72

Fuente: elaboración propia. Se tomaron como punto de partida los indicadores propuestos por Neri-Noriega et al (2008).

En la Figura 1 se muestran graficados los valores de los indicadores de la Tabla 4, de los cuales, el más importante a destacar es el potencial energético ya que tiene un puntaje de casi 100, lo cual significa que las PTAR tienen un enorme potencial de mercado dentro de la economía circular.

Un resultado que deja ver que el tratar el agua de manera eficiente no contribuye, en gran medida, es el indicador de eficiencia en evolución del acuífero y la contribución a su restablecimiento sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (NOM-011-CONAGUA-2015). El motivo es que

se requiere un conjunto de acciones que incluyan no solo el mejor uso del agua tratada.

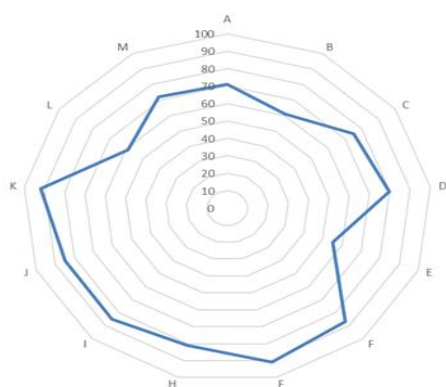


Figura 1. Biograma de los valores óptimos e indicadores de la sustentabilidad en una PTAR. Fuente: Elaboración propia. Se tomó como base la metodología de Sepúlveda (2008).

En cuanto al clima de México hay periodos prolongados de falta de lluvia todos los años, pero suelen ocurrir en regiones aisladas, durante menos tiempo y con menos intensidad lo cual ha ocasionado el volumen de recarga por lluvia del 61 %.

El nivel de participación de los usuarios fue estimado a través de los Consejos Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) que están formados por todos aquellos que cuentan con un título de concesión por cada uso del agua y son representados a través de un Consejo Directivo (Neri-Ramírez et al, 2013) .

Por otra parte, el consumo de agua en la agricultura en un contexto global se ha incrementado para satisfacer la demanda para la producción de alimentos y esto ha ocasionado su escasez, lo cual ha provocado que este sector centre su atención en incrementar rendimientos y reducir el consumo de agua, dada la relativa baja eficiencia en países con grandes superficies agrícolas.

Respecto a la calidad del agua ha disminuido debido a que, una amplia gama de contaminantes acaba en los lagos, ríos, arroyos, aguas subterráneas y, finalmente, en los océanos de nuestro planeta, esto ocasionó un nivel de contaminación de aguas de un 80 % (iAgua, 2017)

La contaminación del agua junto con la sequía, la ineficacia y el aumento de la población ha contribuido a problemas en la superficie agrícola, la cual se ha afectado en un 55 % por problemas con el suelo debido a la contaminación, la cual provoca una reacción en cadena que altera la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro (iAgua, 2019; National Geographic, 2023).

También se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio de sus nutrientes (ONU, 2021).

Establecer el costo y el precio del agua regenerada es importante en el diseño y la explotación de un sistema de regeneración y reutilización de aguas residuales (SRRAR). En lo general, no es posible establecer el precio de agua regenerada ya que no existe un mercado establecido que permita determinarlo, y, de acuerdo con Seguí et al (2014) el único valor que se podría considerar como una referencia es el precio establecido para el agua proveniente de fuentes convencionales. Precio que no refleja todos los impactos que requiere la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

El análisis económico-financiero tradicional de un SRRAR centra su atención en los costos e ingresos privados del sistema e incorpora las externalidades del proyecto a través de un análisis de impactos externos, digamos que es una forma de tener una herramienta a la medida.

Tomando como base el criterio anterior, El costo de reutilización del agua se tomó como base la información de los reportes de CONAGUA \$ 5.00/l (cinco pesos mexicanos por litro) y para los costos de extracción se consideraron valores de entre \$ 0.8 MXN y \$ 2.5 MXN por kW/l (de 80 centavos a 2 pesos 50 centavos por kW/litro) según registros históricos de la CFE.

Considerando estos valores se obtiene que el costo de reúso del agua tiene un valor del 87 %. Al tomar en cuenta el potencial hídrico que hay en el mercado para la producción de energía, notoriamente importante, se asigna un valor del 91 %.

Los valores de disponibilidad de agua se basaron en estimaciones según la metodología de la NOM-011-CONAGUA-2015 y los registros históricos de CONAGUA.

La disponibilidad de agua en una cuenca se refiere a la disponibilidad natural del recurso o escurrimientos naturales que se generen en ella, contexto distinto al jurídico-administrativo o regulatorio (Silva-Hidalgo, 2013).

Publicaciones en revistas especializadas consideran que el indicador de disponibilidad del volumen de agua disponible tiene un valor de 81 %. Sin embargo, considerando que actualmente un mayor número de personas en el planeta toma conciencia humana de los problemas que existen con el agua se estima que este es un valor subvalorado (UNESCO, 2023).

En cuanto al consumo per cápita, se tomaron valores promedio de consumo durante los dos periodos analizados obtenidos con base en lo publicado por la UNESCO en 2003. El valor económico del agua subterránea se obtuvo mediante estimaciones, tomando como base las cuotas de agua potable con un valor de 85 % (Neri-Ramírez et al, 2013).

Para el costo de reúso del agua, en el sistema alternativo se observó que, en los últimos 20 años se han hecho esfuerzos por hacer rentable el reúso de agua como una alternativa para ahorrar, ya que de acuerdo con la Figura 1 este indicador se acerca hasta en un 92 % al valor óptimo, mientras la participación social en la toma de decisiones fue de un 59 % debido a la baja participación y la falta de espacios para la participación de la sociedad (Neri-Ramírez et al, 2013)

En cuanto al índice de desarrollo humano es de un 72 % lo que permite decir que en la actualidad este indicador económico tiene una tendencia hacia la sustentabilidad.

Por otra parte, el índice de funciones ambientales, que agrupa a los subíndices agua, suelo y auto sustentabilidad, registra un grado del 1 al 100, los valores bajos representan las deficiencias de las bases productivas de una PTAR, así como las razones por las que se encuentran en un mal estado.

Los indicadores de agua disponible para riego y consumo humano, así como el indicador de resiliencia de los ciclos del agua y de equidad y, particularmente el subíndice de disponibilidad de agua para riego y para uso doméstico son de los que más deben de preocuparse y ocuparse los gestores públicos (IWA, 2017)

El subíndice de servicios de auto sustentabilidad se encuentra en un estado malo, ya que todos sus indicadores de productividad, estabilidad, confiabilidad y resiliencia no satisfacen los requerimientos mínimos de las sociedades que los habitan.



El subíndice de propiedades del suelo también se encuentran en mal estado ya que no se aprovecha los materiales sólidos inorgánicos no metálico, con casi idéntico resultado del estado de sus indicadores, siendo el más preocupante el referido a la equidad en el acceso a recursos, que implica que son pocas las familias que tienen acceso a suelos fértiles; ello implica una latencia de futuros conflictos dentro las comunidades campesinas, por esta razones se concluyó que la mejor forma de obtener fertilizantes a un bajo costo es por medio de los tratamiento biológicos.

Finalmente, el índice de sustentabilidad de sistemas productivos, que agrupa a los subíndices de cultivos agrícolas, producción ganadera y correspondencia entre uso actual y uso potencial del suelo, Los subíndices que determinan el dato final del índice de sustentabilidad tienen la misma tendencia, destacando algunos indicadores que tienen una situación “mala”, con ello en referencia a la incertidumbre que generan los cambios en el clima a los campos de cultivo.

## 6. - Discusión

En Europa, se realizó un modelo económico de economía circular para el tratamiento de agua y aguas residuales que comprendía la reducción, la recuperación, la reutilización, el reciclaje, la recuperación, así como el replanteamiento de cómo utilizar los recursos para crear una economía sostenible. (Parlamento Europeo, 2023; Smol et al, 2020).

Se observa a partir de los marcos anteriores que, más allá de la reducción de contaminantes que plantean riesgos potenciales para los humanos y el medio ambiente, la recuperación de recursos y el reuso de aguas residuales se han vuelto cada vez más importantes en la economía circular (Robles et al, 2020).

Por otra parte, la mayoría de los recursos para la construcción de una PTAR provienen de incentivos políticos, institucionales, regulatorios y financieros para el desarrollo de proyectos de recuperación de recursos. Es por ello por lo que el Banco Mundial hace énfasis en la reutilización de aguas residuales y la recuperación de recursos por medio de proyectos y programas que promuevan la implementación de uno o varios principios de economía circular (Díaz Lázaro-Carrasco, 2021).

De esta forma, como lo menciona, el Banco Mundial (2020), se propone la obtención de productos recuperados de las aguas residuales a través de tratamiento secundarios en el cual sirve para obtener subproductos.

Las PTAR que implementan un tratamiento secundario requieren una inversión mayor en la mano de obra sin embargo ya se ha demostrado que aquellas que no utilizan este tipo de tratamiento su vida útil no es mayor a 20 años y aquellas que utilizan sistemas secundarios puede ser mayor a 100 años.

En el criterio del presupuesto se consideran diversos factores como son la capacidad de la planta de tratamiento, la tecnología utilizada, el estado de la infraestructura y las dificultades para su construcción.

Otro aspecto son los sitios donde el aforo de aguas residuales favorecía aquellas plantas que tuvieran un aforo cercano a los 10 l/s<sup>1</sup>. Esto se debe a que, a mayor caudal de aguas residuales, las instalaciones tienen una mayor capacidad y tamaño, lo que requiere de más recursos para su intervención.

Tal es el caso de la PTAR Ciudad de México, Atotonilco cuenta con una capacidad nominal de tratamiento medio de

35 m<sup>3</sup>/s y un máximo de 50 m<sup>3</sup>/s, incluida la evacuación final de los residuos sólidos y lodos que se generen (iAgua, 2018)

Los principales impulsores para el desarrollo de la industria de las aguas residuales son las necesidades globales de nutrientes y la recuperación de agua/energía de las aguas residuales (Neczaj y Grosser, 2018). Sin embargo, los beneficios económicos potencialmente altos de la aplicación del modelo de economía circular en los sistemas de tratamiento de aguas residuales incentivan los crecientes intereses de inversión e industria.

Mientras tanto, diferentes rutas de recuperación de recursos y reutilización potencial son relevantes para una transición de economía circular entre los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales existentes y las alternativas emergentes en agua, energía y productos de valor agregado (Neczaj y Grosser, 2018).

Además, la mejor eficacia, valor económico y potencial de producción de energía de los lodos de los sistemas de tratamiento biológico, subrayan su considerable preferencia sobre los procesos de tratamiento mecánico y químico (Ali et al, 2020).

También las PTAR que cuentan con un diseño basado en procesos pasivos de tratamiento, como son los sistemas anaerobios, humedales artificiales y/o lagunas de estabilización. El criterio de la tecnología de tratamiento se relaciona directamente con el criterio del presupuesto.

En la Figura 2 se muestra cómo es el proceso de recuperación de nutrientes en los residuos en la digestión anaerobia y su proceso para el proceso de digestato.

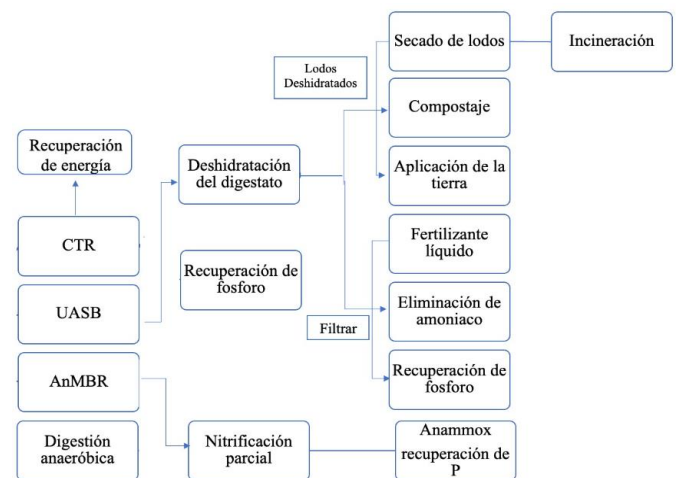


Figura 2. Principales procesos para la recuperación de recursos de las aguas residuales. Fuente: (Ghahdarjani et al., 2022).

El proceso de compostaje es capaz de producir residuos de biomasa estables, reducir los patógenos y proporcionar biodisponibilidad de metales pesados. El compost maduro después del compostaje es bueno para su uso como fertilizante vegetal. (Battista et al, 2019)

El proceso de compostaje también ha demostrado ser un proceso eficiente para mitigar los micro contaminantes que quedan en el digestato, en donde el compostaje es uno de los principales métodos de eliminación que puede reciclar nutrientes como fertilizante (Ghahdarjani et al, 2022).

## 7. -Economía Circular y reutilización del agua

El desarrollo tecnológico alcanzado por la humanidad trajo consigo una expansión en el ámbito socioeconómico, por lo que se prevé que la demanda por el agua va a aumentar significativamente en las próximas décadas debido al aumento tanto en la producción industrial, así como agrícola, servicios, producción de energía, la acelerada urbanización y la expansión de la provisión municipal del agua (Molina, 2011).

Por lo tanto, es necesario la reutilización del agua tratada para la mejorar la disponibilidad de recursos hídricos.

En este sentido, la mejora de la calidad de los efluentes es el elemento clave para el aprovechamiento dentro de un sistema de economía circular, reduciendo la demanda de las aguas superficiales y subterráneas, además de proteger el medio ambiente, economizar energía, reducir inversiones en infraestructura y proporcionar una mejora a los procesos industriales, mostrando que tal medida beneficia, además del medio ambiente, a la economía, así como a la sociedad, llegando así a proporcionar al hombre la cercanía al ideal de la sostenibilidad.

### *Avance en la recuperación de recursos y economía circular a través de sistemas de tratamiento biológico*

Los principales impulsores para el desarrollo de la industria de las aguas residuales son las necesidades globales de nutrientes y la recuperación de agua/energía de las aguas residuales (Neczaj y Grosser, 2018). Sin embargo, los beneficios económicos potencialmente altos de la aplicación del modelo de economía circular en los sistemas de tratamiento de aguas residuales incentivan los crecientes intereses de investigación e industria.

Diferentes rutas de recuperación de recursos y reutilización potencial son relevantes para una transición de economía circular entre los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales existentes y las alternativas emergentes en agua, energía y productos de valor agregado (Saravia-Matus et al, 2022). Además, la mejor eficacia, valor económico y potencial de producción de energía de los lodos de los sistemas de tratamiento biológico, subrayan su considerable preferencia sobre los procesos de tratamiento mecánico y químico (Ali et al., 2020).

## 8. Conclusiones

De acuerdo con la investigación realizada, los procesos biológicos actuales de las PTAR, desde un enfoque de economía circular deben enfocarse en identificar los procesos más eficientes con la finalidad de lograr su auto sustentabilidad. En tal sentido, se agrupan en relación con los siguientes dos objetivos: el ciclo de vida completa de una PTAR y el establecimiento de un sistema de indicadores que exprese tanto las cualidades del MESMIS, como un modelo funcional basado en la economía circular implementados en sistemas de tratamientos biológicos

De esta forma se identificaron y caracterización de los sistemas de vida de una PTAR, fueron base fundamental para identificar las fortalezas así como las deficiencias que tiene además de la parte sociocultural y los sistema de producción, estos resultan ser pertinentes para conocer productividad, deficiencias, carencias, oportunidades de mercado, de esta

forma se logró realizar una análisis comparativo de las nuevas tecnologías las cuales se puedan implementar de manera realista como técnica como económicamente, en la perspectiva de que el análisis de auto sustentabilidad que forme parte de la dinámica habitual en las PTAR.

Por este motivo, la integración prospectiva de la recuperación de recursos en el tratamiento de aguas residuales, con ayuda de las nuevas tecnologías es necesario para la transformación de estos recursos, trayendo un modelo de economía circular a las PTAR.

Las tecnologías emergentes en los tratamientos biológicos permiten la obtención de subproductos, por ejemplo, la producción de abono, criadero de peces, cría de plantas, biogás y etc., los cuales se consideran beneficios para la auto sustentabilidad de la PTAR.

En años recientes una PTAR de lodos activados “aireación extendida”, tiene un costo de operación anual medio aproximado de \$16,637,792.61 MXN (Cortázar, 2020).

Tomando como base estos datos y los obtenidos por García-Barrios y González-Espinosa (2017) en la Tabla 5 se muestra que realmente el costo aproximado para la construcción y operación de una PTAR en México, con capacidad de 70 l/s (6,048 m<sup>3</sup>/d) es un poco mayor que equivalen a 6,048 m<sup>3</sup>/d.

En este caso (Tabla 5) la construcción de la PTAR requiere una inversión de \$347,073.05 MXN/l/s de agua a tratar y durante la etapa de operación, el costo de producción de cada m<sup>3</sup> de agua tratada es de \$1.23 MXN, siendo los costos mensuales de operación de \$224,544.00 MXN, carga económica importante para las autoridades municipales, lo que incrementa el riesgo de abandono o de mantenimiento deficiente a las instalaciones de ahí la importancia de que la planta genere su propia sustentabilidad financiera.

Tabla 5. Costos paramétricos para la construcción de una PTAR en México

Características de la PTAR		Lodos activados
Cap. de la planta (l/s)		70.0
Inversión inicial (MXN)		24,295,113.70
Costo de operación mensual (MXN/mes)		235,927.71
Tasa de financiamiento (%)		12
Periodo de amortización (año)		20
Tarifa (pesos/m <sup>3</sup> )		2.85
Valor presente neto (pesos)		848,503.11
Tasa interna de retorno (%)		1,924.13
Costo resultante por m <sup>3</sup> de agua tratada		
Año	Costo mensual (S/IVA)	\$/m <sup>3</sup>
<b>Costos fijos</b>		
Mano de obra	\$ 28,908.00	\$ 0.15
Análisis de laboratorio	\$ 8,767.00	\$ 0.05
Mant. de planta Indirecto	\$ 48,666.18	\$ 0.25
operación	\$ 25,002.14	\$ 0.13
	\$ 104,206.00	\$ 0.58
<b>Costos variables</b>		
Energía eléctrica	\$ 1,471.68	\$ 0.01
Desinfección UV	\$ 10,512.00	\$ 0.06
Desalojo de lodos	\$ 0.00	\$ 0.00
Depreciación		
Total, Costos	\$ 224,544.00	\$ 1.23

Fuente: García-Barrios y González-Espinosa (2017).



### Rendimiento del tratamiento y uso potencial

Las instalaciones de los lodos activados no requieren áreas de gran extensión, claro que eso dependerá de la cantidad de agua (en l/s) de la PTAR así entre otras ventajas están que son libres de malos olores y que no producen desechos. Además de la mejora de la densidad del lodo de sedimentación rápida, las zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas distintivas las cuales promueven una mayor calidad del efluente (Nereda, 2022).

El uso múltiple de aguas residuales tratadas se ve reforzado por la calidad del efluente y puede contribuir significativamente a un mayor uso de agua regenerada en regiones con escasez de agua o para diversos servicios no potables.

El uso agrícola de agua recuperada en las áreas con escasez de agua es fundamental para la extracción eficiente de agua dulce para uso portátil. Según Liao et al (2021), entre 2015 y 2019, 398 millones de personas se vieron afectadas por la sequía en Asia.

Mientras tanto, el reciclaje de nutrientes de las PTAR para la obtención de fertilizantes tiene un impacto positivo en el medio ambiente al reducir la demanda y la producción de fertilizantes fósiles convencionales y, en consecuencia, reducir el consumo de agua y energía (Mo y Zhang, 2013).

La principal ventaja de este tipo de sistema es que la eficiencia de remoción de los contaminantes es alta. A su vez no desperdicia agua, ya que el efluente que si cumple con los estándares de calidad se reutiliza en las actividades de la empresa y la pequeña parte que no queda completamente limpia sirve para crear los lodos. (CBR Ingeniería, 2021)

Sin duda, la innovación y el uso de nuevas metodologías para la estimación del mercado potencial de los recursos recuperados a través de una PTAR considerando la demanda potencial de los recursos recuperados revela hasta qué punto puede verse como una oportunidad de lograr la sustentabilidad de las plantas depuradoras y, además la satisfacción potencial de las necesidades actuales en otros mercados (Saravia-Matus et al, 2022).

Es decir, comprender el potencial de mercado de los recursos disponibles en aguas residuales antes de que se realicen inversiones significativas permitirá una planeación adecuada de su utilización. Kehrein et al, (2020) publicaron una revisión crítica de las tecnologías disponibles para recuperar recursos.

Cada recurso se considera de forma independiente, por lo que el potencial de mercado representa la máxima recuperación de recursos que podría lograrse en circunstancias ideales utilizando las tecnologías apropiadas (CEPAL, 2019)

El potencial de mercado se encuentra calculando la cantidad total de un producto que se puede recuperar de las aguas residuales en comparación con la demanda total del mercado para ese producto (Banco Mundial, 2020)

No obstante, para conocer las formas de manejo y analizar el estado en que se encuentran los sistemas en las situaciones actuales de una PTAR hubo de generarse un diagnóstico de sus requerimientos adicionales, así como del mantenimiento preventivo y correctivo requerido, ya que, como indica la Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCyTU) en nota publicada en enero de 2019 la mayoría de las plantas no se encuentran, al menos en México, en condiciones adecuadas de funcionamiento y no cuentan con un tratamiento secundario.

MESMIS es una herramienta que permitió acercarse al conocimiento del estado de la auto sustentabilidad para conocer sus puntos fuertes y débiles. Y, es especialmente útil considerando la complejidad que resulta medir la sustentabilidad, estudios como este, suman nuevos elementos para continuar en la construcción de la sustentabilidad de los sistemas; sin embargo, esto dependerá de las condiciones en las que se encuentran las plantas hoy por hoy.

### Acrónimos

PTAR, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

O&M, Operation and Maintenance

ADO, Asistencia oficial para el desarrollo

DBO, DBO5, Demanda biológica de oxígeno

DQO, Demanda química de oxígeno

COT, Carbono orgánico total

CSTR, Reactor de tanque agitado de flujo continuo

UASB, Reactor anaerobio flujo ascendente alta eficiencia.

### Referencias

- Ali, J., et al. (2020) *Modalidades para la conversión de residuos en energía: desafíos y perspectivas*. Ciencia del medio ambiente total. Elsevier. 727: 138610  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138610>
- Anda, M., et al. (2010). *Tratamiento y reciclaje descentralizado de aguas residuales en aldeas urbanas*. Water Practice & Technology, Vol. 5 (3). IWA publishing.  
<https://doi.org/10.2166/wpt.2010.047>
- Arriols, E. (2018). *Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican*. Ecología verde. Recuperado en 16 de febrero de 2023, de: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Astier, M., et al. (2008). *Evaluación de sustentabilidad: un enfoque dinámico y multidimensional*. Producción conjunta: SEAE, Publicaciones CIGA, UNAM, ECOSUR, CIEco, Mundiprensa, Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable de España. Valencia, España.  
<https://doi.org/10.22201/ciga.9788461256419e.2008>
- Banco Mundial (2020). *El Agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías*. Banco Mundial. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
- Basurto, I. (2021). R3 U1 desarrollo sustentable v2 terminado y aplicado a la universidad. Prácticas Desarrollo Sustentable (CA0010) Universidad Virtual del Estado de Guanajuato, pp. 7, 2021/2022
- Battista, B., et al. (2019) *Energy and Nutrients' Recovery in Anaerobic Digestion of Agricultural Biomass: An Italian Perspective for Future Applications*. Energías 2019. MDPI 12 (17) 3287.  
<https://doi.org/10.3390/en12173287>
- Bigio, J. (2018). "México produce un millón de litros de aguas residuales cada cuatro segundos." Periódico El País. Recuperado en 16 de febrero de 2023, de: [https://elpais.com/internacional/2018/03/21/mexico/1521659492\\_767138.html](https://elpais.com/internacional/2018/03/21/mexico/1521659492_767138.html)
- CBR Ingeniería (2023) *Tratamiento de aguas residuales con lodos activados*. CBR Ingeniería, expertos en el tratamiento. Blog. Recuperado el 22 de junio de 2023, de: <https://blog.cbr-ingenieria.com.mx/tratamiento-de-aguas-residuales-con-lodos-activados>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad*. Desarrollo Sostenible. CEPAL. Santiago de Chile. Recuperado el 20 de marzo de 2023, de: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e43ad745-6b7d-48e4-a016-b753fdd3b659/content>
- Cortázar, G. (2020). *Planta de tratamiento de aguas residuales "dren merino"*. Informe del Medio Ambiente. SEMARNAT. Recuperado en 16 de febrero de 2023, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>

- Díaz Lázaro-Carrasco, J. A. (2021). La economía circular, el agua y la reutilización. *Connecting Waterpeople*. Reutilización. iAgua. Recuperado el 20 marzo de 2023, de <https://www.iagua.es/blogs/jose-antonio-diaz-lazaro/economia-circular-agua-y-reutilizacion#:~:text=En%20la%20econom%C3%ADa%20circular%20e,permiten%20regenerar%20los%20materiales%20descartados>.
- De Anda-Sánchez, J. (2017). *Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México*. Sociedad y Ambiente. 8 (14) pp.119-143. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n14/2007-6576-sya-14-119.pdf>
- Environment Canada (2023). *National environmental indicator series. Environmental impact, Environmental indicators & Pollution*. Government of Canada. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de <https://publications.gc.ca/site/eng/452442/publication.html>
- García-Barrios, L. y González-Espinosa, M., (2017). *Tratamientos biológicos en la investigación ecológica participativa en procesos de manejo de aguas residuales Chiapas, México*. Suplemento, diciembre: La Ecología en México: retos y perspectivas. Revista Mexicana de Biodiversidad. 88, pp. 129-140 <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.022>
- Ghahdarjani, A. R. J., et al. (2022) Vermi-compostaje de lodos de depuradora con materiales de carga orgánicos para mejorar sus propiedades. *Monitoreo y Evaluación Ambiental*. 194 (555). Ed. Springer. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-10236-Z>.
- iAgua (2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. Blogs día mundial del agua 2017. iAgua. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>
- iAgua (2018). *La EDAR de Atotonilco, la mayor planta de tratamiento de aguas residuales del mundo*. *Connecting Waterpeople*. iAgua. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.iagua.es/noticias/acciona-agua/edar-atotonilco-mayor-planta-tratamiento-aguas-residuales-mundo-cumple-ano>
- iAgua (2019). *La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena que acaba afectando a la salud humana*. Cambio Climático. iAgua. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.iagua.es/noticias/fundacion-aquae/contaminacion-suelo-provoca-reaccion-cadena-que-acaba-afectando-salud>
- IWA Publishing (2018) *Indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua*. Manual de buenas prácticas. IWA publishing. Editorial UPV. España. Pp. 439. ISBN 978-84-9048-664-1. Recuperado el 22 de junio de 2023, de: [https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/Manual%20PI%20IWA\\_ES.pdf](https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/Manual%20PI%20IWA_ES.pdf)
- INCyTU (2019) Tratamiento de aguas residuales. Foro Consultivo (FCCyT). Nota 028. Recuperado el 22 de mayo de 2023, de: [https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU\\_19-028.pdf](https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf)
- Jhuesa Water Technology (2021). Operación y Mantenimiento (O&M). Recuperado el 23 de enero de 2023, de: <https://jhuesa.com/actividad/postventa/operacion-y-mantenimiento-om>
- Kadlec, R. H. & Wallace, S. D. (2009) *Treatment Wetlands*. Editorial CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, Florida, USA. pp. 366 ISBN 978-1-56670-526-4 (alk. paper). Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition\\_0.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf)
- Kehrein, P. et al. (2020). *A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants–market supply potentials {,} technologies and bottlenecks*. *Revista Ciencias Ambientales: investigación y tecnología del agua*. Número 6 (2020) pp. 877-910 <https://doi.org/10.1039/C9EW00905A>
- Liao, Z., et al. (2021) *Wastewater treatment and reuse situations and influential factors in major Asian countries*. *Journal of Environmental Management*. Ed. Elsevier. 282, 111976 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111976>.
- Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Ed. McGraw-Hill. pp. 1485. España. ISBN: 84-481-1612-7
- Mijangos-Pulido, V. M. y De Anda-Sánchez, J. (2021) *Metodología multicriterio para la selección de sitios para la reconversión tecnológica de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. *Sociedad y Ambiente*. 24 pp. 01-28. <https://doi.org/10.31840/sya.vi24.2413>
- Molina, A. (2011). *La reutilización de las aguas residuales en España – un modelo de sostenibilidad*. *Revista Electrónica Direito & Política*. 6 (2) Universidad de Alicante, España. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: [www.univali.br/direitoepolitica](http://www.univali.br/direitoepolitica).
- Mo, W. & Zhang, Q., (2013). *Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants* *Journal of Environmental Management*. Editorial Elsevier. 127, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.007>
- National Geographic (2023). *La contaminación del agua constituye una crisis mundial creciente*. Esto es lo que hay que saber. *Medio Ambiente*. National Geographic. Recuperado el 21 de junio de 2023, de: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- Neczaj, E. y Grosser, A. (2018) *Economía circular en plantas de tratamiento de aguas residuales*. 3ª. Conferencia Internacional de EWaS sobre Perspectivas sobre el nexo agua-energía-alimentos. *Actas 2018*. 2 (11) pp. 614. <https://doi.org/10.3390/procedings2110614>
- Nereda (2022). *Aerobic granular sludge Technology*. Aqua-Aerobic Systems Inc. Recuperado el 31 de enero, de 2023, de <https://jciind.com/aerobic-granular-sludge-aquanereda-aqua-aerobics/>
- Neri-Noriega, R., et al. (2008). *La sustentabilidad de los sistemas agrícolas con pequeña irrigación, el caso de San Pablo, Actopan, Puebla*. *Revista Ra Ximhai* 4 (2) pp. 139-163. Editorial Universidad Autónoma Indígena de México. Recuperado el 23 de mayo de 2023, de: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46140208.pdf>
- Neri-Ramirez, E., et al. (2013). *Evaluación de la sustentabilidad del acuífero Cuautitlán-Pachuca mediante el uso de la Metodología MESMIS*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19 (2), 273-286. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.086>
- Noyola, A., et al. (2019). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://aidisnet.org/iunam-seleccion-tec-trat-aguas-residuales/>
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (1993). *OECD core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment*. *Environment monographs*, n° 83. OCDE/GD (93)179, pp. 39. Recuperado el 22 de junio de 2023, de: [https://one.oecd.org/document/OCDE/GD\(93\)179/En/pdf](https://one.oecd.org/document/OCDE/GD(93)179/En/pdf)
- Organización de las Naciones Unidas (2021). *La Economía Circular: Un Modelo Económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el Medio Ambiente*. Noticias. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://news.un.org/es/story/2021/03/14/90082>.
- Organización de las Naciones Unidas (2023). *Agua. Desafíos Globales*. Naciones Unidas. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Parlamento Europeo (2023) *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Economía. Recuperado el 22 de junio de 2023, de: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201S TO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Robles, A., et al (2020) *New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy*. *Bioresource Technology*. Ed. Elsevier. 300, 122673. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122673>
- Rodríguez, D. J. (2018) *Tratamiento de aguas residuales: elemento necesario en una economía circular*. Voces. Banco Mundial Blogs. Recuperado el 23 de enero de 2023, de: <https://blogs.worldbank.org/es/voices/tratamiento-de-aguas-residuales-elemento-necesario-en-una-economia-circular>
- Rodríguez-Rodríguez, L. (2019) *Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales*. *Ciencia y Tecnología*. Universidad de Costa Rica. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/2/15/humedal-artificial-una-propuesta-para-el-manejo-de-aguas-residuales.html>
- Saravia-Matus, S., et al. (2022). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. *Recursos Naturales y Desarrollo*. CEPAL. pp. 100. Recuperado el 22 de mayo de 2023, de: <https://repositorio.cepal.org/items/28d129e6-2774-4544-9437-fe8e5622aa50>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2005) *Indicadores básicos del Desempeño Ambiental en México*. Sistema Nacional de Indicadores Ambientales y de los Recursos Naturales. SEMARNAT. Recuperado el 22 de mayo de 2023, de: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00\\_conjunto/marco\\_conceptual2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual2.html)
- Seguí, L., et al. (2014) Metodología para el análisis técnico-económico de los sistemas de regeneración y reutilización de las aguas residuales. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 2, pp. 55-70. Recuperado el 22 de mayo de 2023, de:

- <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a4.pdf>
- Sepúlveda, S. (2008). *Metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de territorios*. Biograma. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 132 pp. ISBN 13: 978-92-9039-872-1. Recuperado en 19 de febrero de 2023, de: <http://repiica.iica.int/docs/B0664e/B0664e.pdf>
- Smol, M., et al. (2020) *Marco del modelo de economía circular en el sector europeo del agua y las aguas residuales*. Revista de ciclos de materiales y gestión de residuos. Ed. Springer. Japón (22) pp. 682-697 <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Silva-Hidalgo, H. (2013) *Modelo matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas*. Tesis de doctorado. Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- (CIMAV), 2013. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de: <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/662>
- UNESCO (2023) *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua*. Programa Mundial de la UNESCO de evaluación de los Recursos Hídricos. pp. 213. París, Francia. ISBN 978-92-3-300212-8. Recuperado el 28 de julio de 2023, de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807>
- Zurita, F., et al. (2011) *Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface flow constructed wetlands*. Ecological Engineering Journal, Ed. Elsevier. 35 (5) pp. 861-869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>