

Panorama ambiental del Caribe mexicano como sector hotelero en crecimiento y generador de aguas residuales; retos y alternativas

Environmental overview of the Mexican Caribbean as a growing hotel sector and generator of wastewater; challenges and alternatives

—

José Ariosto Moreno Pérez
ariostomoreno8@gmail.com

Apolinar Oliva Velas
cuitt2006@yahoo.com

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS. LABORATORIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL, BARCELÓ MAYA GRAND RESORT. SOLIDARIDAD, QUINTANA ROO. MÉXICO

Para citar este artículo:

Moreno Pérez, J. A. Panorama ambiental del Caribe mexicano como sector hotelero en crecimiento y generador de aguas residuales; retos y alternativas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 14(39). <https://doi.org/10.31644/IMASD.39.2025.a05>

RESUMEN

El sector hotelero en el Caribe mexicano alberga millones de turistas al año, representando una fuerte generación de empleos. El agua residual hotelera tiene altas concentraciones de grasas y aceites, provenientes de las cocinas y restaurantes, esto representa un problema en los procesos biológicos de tratamiento de agua residual, específicamente en la aparición de bulking filamentoso. Bacterias filamentosas como *Thiothrix spp.*, *Microthrix parvicella*, tipo 1701, *Gordonia spp.* y tipo 0041 provocan problemas de sedimentación acarreado sólidos al efluente, provocando una mala calidad de agua residual tratada. En el presente estudio se analizaron los problemas anteriormente mencionados, además de señalar a los interceptores de grasas y los sistemas de flotación de aire (DAF) como tecnologías eficientes y económicas para la remoción de grasas y aceites a la entrada de los sistemas de tratamiento. Se concluyó que, en complemento del uso de tecnologías, se deben incluir capacitación al personal y a los huéspedes, y fomentar mejores prácticas de cocina y hábitos alimenticios para disminuir el consumo de alimentos que contengan grasas y aceites.

Palabras clave:

Hotelería; turismo; agua residual; bulking; lodo activado.

— Abstract—

The Mexican Caribbean hosts millions of tourists per year, this is an important source of job in the region. Hotel wastewater has high concentrations of fats and oils from kitchens and restaurants. These compounds cause several reactions with de components of wastewater and represents a problem in biological wastewater treatment processes, specifically filamentous bulking events. Filamentous bacteria such as *Thiothrix* spp., *Microthrix parvicella*, type 1701, *Gordonia* spp. and type 0041 causes settling problems, carrying solids to the effluent, causing poor quality of treated wastewater. This study has the aim to analyze those problems, and to underline technology as grease interceptors and dissolved air flotation systems (DAF), who represent efficient and economical technologies for removing fat and oil at the inlet of treatment systems. It was concluded that in addition to the use of technologies, strategic training programs should be included for staff and guests in general, to promote better kitchen practices and healthy food habits to reduce the consumption of fat and oils food.

Keywords:

Hospitality; tourism; wastewater; bulking; activated sludge.

TURISMO, HOTELERÍA EN EL CARIBE MEXICANO Y AGUA RESIDUAL

La Secretaría de Turismo (SECTUR) señala que el sector hotelero en México representa el 28.7% del producto interno bruto turístico. El país se encuentra en la 7ª posición a nivel mundial en infraestructura hotelera (International Hotel Consulting Services, 2022, Secretaría de Turismo, 2022). Para el año 2022, hubo una inversión de 215 mil millones de pesos, en 521 proyectos turísticos, generando 115 mil empleos directos e indirectos. Los estados con mayores montos de inversión fueron Nayarit, Ciudad de México, Baja California Sur, Yucatán, Quintana Roo y Guerrero (Secretaría de Turismo, 2022). En el periodo 2019-2023, la infraestructura hotelera del país creció de 23 600 establecimientos a 25 500, y se estima que esta tendencia continúe en años próximos (Statista, 2024).

Como destino turístico, la zona del Caribe Mexicano es una potencia a nivel mundial, debido a sus paisajes, riqueza cultural y accesibilidad económica. Comprende destinos como Cancún, Puerto Morelos, Isla Mujeres, Cozumel, la Riviera Maya, Bacalar y otros destinos (SECTUR, 2015, 2023). Después del levantamiento del distanciamiento social provocado por la pandemia de la COVID-19, en los hoteles de estos destinos populares se observó un aumento en la ocupación de 45.5%, con una afluencia de 13 530 307 turistas en 2021, a 19 680 330 en 2022, representando una derrama económica de \$19 425.90 millones de dólares (SEDETUR-QR, 2022). Es por ello que el turismo representa una de las mayores fuentes de ingresos para el país, sólo superada por las remesas internacionales (SECTUR, 2023; Statista, 2024), y además favorece el empoderamiento, integración y obtención de ingresos de poblaciones vulnerables como las comunidades rurales y pueblos indígenas (International Hotel Consulting Services, 2022; SEDETUR-QR, 2022; Statista, 2024).

En el ámbito ambiental, el sector hotelero representa un problema de contaminación, siendo una de las fuentes más importantes de producción de aguas residuales en zonas costeras, con características variadas. La creciente demanda de agua potable recae en los servicios, que van desde el llenado de jacuzzis y albercas, estanques artificiales hasta el lavado de sábanas, mantelería, limpieza de cuartos, utensilios de cocina, entre otras actividades. Toda esta agua requerida, después de ser utilizada se convertirá en agua residual (Abdul Khader & Chinnamma, 2021; Estévez et al., 2022). En zonas de importancia turística como Cancún, se estima que el uso de agua potable en los hoteles ronda los 550 L * huésped⁻¹ * noche⁻¹, aunque estas estimaciones pueden variar dependiendo de la naturaleza del destino turístico (Sánchez González, 2022; Santacruz de León & Santacruz de León, 2020), este volumen excede el promedio de agua usado en actividades domésticas, que rondan los 144 L * persona⁻¹ * día⁻¹ (Estévez et al., 2022).

La Secretaría de Turismo del Estado de Quintana Roo (SEDETUR-QR, 2022) reporta que, solamente en Cancún hay 207 hoteles, con un total de 43 109 habitaciones, y para el año 2022 tuvo una afluencia de 6 786 004 turistas. Para este mismo año, en la zona del Caribe había un total de 1 331 hoteles, distribuidos en 11 municipios, los cuales recibieron 19 680 330 turistas (SEDETUR-QR, 2022). De acuerdo al Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR, 2018), la ciudad de Cancún, una de las más desarrolladas del Caribe, tiene la infraestructura para tratar $4\,707\,798\text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ de agua residual, considerando únicamente las aguas residuales descargadas al sistema de drenaje y alcantarillado, sin embargo, no existe información oficial detallada sobre el consumo de agua per cápita, de generación de agua residual por complejos hoteleros, ni de la infraestructura privada para el tratamiento del agua residual en la región (Biosilva A. C., 2015; Sánchez Gonzáles, 2022).

Es importante dimensionar las capacidades de tratamiento de agua residual en estas ciudades en desarrollo, incluyendo las de cada hotel, ya que la tendencia del aumento poblacional y de proyectos turísticos en el Caribe Mexicano, agudizan la incertidumbre sobre la infraestructura de tratamiento de agua residual, y si ésta logrará a corto plazo cubrir en su totalidad el tratamiento adecuado del agua residual, ya que actualmente los cuerpos de agua en el Caribe reciben descargas de agua contaminada, representando un serio problema ambiental y de salud pública (Biosilva A. C., 2015).

Contaminantes como las grasas y aceites, presentes en las aguas residuales de los hoteles, figuran como uno de los principales problemas, tanto en daños a la infraestructura (tuberías y alcantarillado), en la operación de sistemas de tratamiento de agua residual, y al medio ambiente cuando las aguas residuales no reciben el tratamiento adecuado. Por un lado, en presencia de Ca^{2+} , la grasa suele solidificarse y adherirse en las paredes de las tuberías, que, con el paso del tiempo causa obstrucciones y malos olores, mientras que los aceites, al por sus propiedades químicas hidrofóbicas, forman una capa en la superficie de los cuerpos de agua, impidiendo el paso de la luz y de oxígeno, afectando los procesos bioquímicos de la vida acuática (Khoury et al., 2023; Klaukans & Sams, 2018).

Este texto tiene como finalidad analizar el escenario en el que se encuentra el Caribe Mexicano como destino turístico en desarrollo y los retos a enfrentar debido a las cantidades de agua residual generadas y sus características, específicamente las grasas y aceites, así mismo subrayar los problemas que representan estos compuestos en los tratamientos biológicos convencionales, así como las tecnologías y/o metodologías disponibles para afrontar estas problemáticas, que se relacionan directamente con la sustentabilidad y aprovechamiento racional del valioso recurso hídrico.

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE HOTELERÍA

En México, antes de ser descargadas al ambiente, las aguas residuales deben ser tratadas para cumplir con la normatividad aplicable y reducir contaminantes como sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO_5 y DQO), grasas y aceites (GYAs), temperatura, pH, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos (coliformes fecales y *Escherichia coli*), por mencionar algunos. A nivel federal la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 es la que establece los límites de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, mientras que la NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, 2022; Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, 1998). Los hoteles instalados en el territorio mexicano deben cumplir al menos una de las normas mencionadas anteriormente, dependiendo de hacia dónde se dirijan sus descargas, para esto se debe recurrir a algún tipo de proceso de tratamiento de agua residual, sin embargo, un 80-90% de las aguas residuales generadas en el caribe mexicano son descargadas sin ningún tratamiento (Biosilva A. C., 2015).

Las principales fuentes de generación de agua residual de hotelería (ARH) vienen de los servicios que los huéspedes requieren y de las áreas correspondientes para cubrir las necesidades. Se pueden señalar como servicios más importantes a los baños (WC), tinas/regaderas, lavabos, cocinas/bares y lavandería (Abdul Khader & Chinnamma, 2021; Estévez et al., 2022).

Abdul Khader & Chinnamma (2021) señalan que, en el agua residual de los hoteles, los principales contaminantes son los SST, la DBO, la DQO, y las GYAs. En su estudio en un hotel-boutique reportaron las siguientes características en el ARH; pH 5, DBO 170 mg/l, DQO 350 mg/L, SST 350 mg/L y GYAs 7 mg/L.

Estévez y colaboradores (2022), determinaron en un estudio realizado para hoteles de cuatro a cinco estrellas en España, las características de las ARH por cada fuente de generación, y contrastaron los contaminantes cuando existen medidas de ahorro de agua y cuando no se consideran, esta información se ilustra en la Tabla 1.

En el estudio citado, se determinó que la mayor concentración de contaminantes en el ARH proviene de la lavandería y la mezcla de aguas del WC, cuando existen métodos de ahorro de agua. En este mismo estudio se puede observar que la concentración de los contaminantes disminuye cuando la cantidad de agua utilizada es mayor (sin métodos de ahorro), pero en la práctica, esto no representa un beneficio, debido a que cuando se produce más agua residual se requiere de cárcamos de mayor capacidad

para su captación y/o de tratamientos más eficientes, aumentando los costes de operación (Cabrera Acevedo, 2011). Estévez y colaboradores (2022) no consideraron en su estudio la concentración de grasas y aceites, pero señalaron nutrientes que forman parte fundamental en procesos de eutrofización como el nitrógeno y el fósforo (Leader et al., 2005). En México, estos nutrientes si son regulados y señalados por la normatividad en materia de agua residual como contaminantes que deben ser reducidos a bajas concentraciones para que el agua pueda ser descargada al suelo o a cuerpos de agua (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, 2022).

Tabla 1
Características del agua residual de hoteles de 4 a 5 estrellas

Composición (mg/L)	Fuente del agua residual (con métodos de ahorro de agua)				
	Tina/regadera	lavabo	lavandería	mezcla	WC (Heces, orina, papel de baño)
Sólidos suspendidos totales (SST)	80.27	86.01	1131.84	248.46	1171.52
Demanda química de oxígeno (DQO)	432.23	421.43	4214.29	1030.16	1472.82
Nitrógeno total	2.84	2.32	14.81	4.63	299.89
Fosforo total	0.10	1.38	2.65	0.79	36.43
Composición (mg/L)	Fuente del agua residual (sin métodos de ahorro de agua)				
	Tina/regadera	lavabo	lavandería	mezcla	WC (Heces, orina, papel de baño)
Sólidos suspendidos totales (SST)	37.46	23.81	396.14	96.20	555.94
Demanda química de oxígeno (DQO)	201.71	116.67	1475.00	398.86	702.23
Nitrógeno total	1.33	0.64	5.18	1.79	142.31
Fosforo total	0.05	0.38	0.93	0.31	17.29

Nota. Consumo medio de agua en hoteles (100 – 249 cuartos) con métodos de ahorro: 12.35 m³ * día⁻¹. Sin método de ahorro: 31.89 m³ * día⁻¹. Métodos de ahorro como grifos de bajo flujo, inodoros eficientes, riegos eficientes, sistemas de regulación de presión, detección de fugas y colección de agua de lluvia para riego. Fuente: editado con datos de Estévez et al., (2022).

Los datos señalados por Estévez y colaboradores (2022) contrastan a los reportados por Pharmawati et al., (2018) quienes mencionan que las características del ARH son similares a las domiciliarias, con los siguientes parámetros y valores; DBO 110-400 mg/L, DQO 250-1000 mg/L, SST 100-350 mg/L, nitrógeno amoniacal (NH₃) 12-50 mg/L y grasas y aceites (GYAs) 50-150 mg/L.

Las diferencias en las características fisicoquímicas del agua residual varían de hotel a hotel, debido a diferentes factores, como la naturaleza de los servicios, el número de habitaciones y sus métodos de consumo

de agua. De los estudios mencionados anteriormente, poco se señalan las características de las aguas de las cocinas y/o restaurantes de los hoteles, específicamente las grasas y aceites, pero existe literatura que abordan estos contaminantes estudiados en establecimientos alimenticios, cuyas características complican el tratamiento del ARH.

GRASAS Y ACEITES EN LAS AGUAS RESIDUALES

Uno de los grandes retos en el tratamiento de agua residual hotelera recae en las grasas y aceites (GYAs), cuyo principal origen son las actividades del servicio de restaurantes y cocina, como el uso de aceites, mantecas o cebos, la preparación de carnes, salsas, caldos, aderezos, quesos, mantequillas, y comida frita (Gurd et al., 2019). Algunos tipos de grasas que se encuentran en la dieta moderna se ilustran en la Tabla 2, estas conforman los menús en las cocinas y restaurantes de los hoteles.

Las GYAs tendrán diferentes estados (sólidos o líquidos viscosos) dependiendo del grado de saturación de sus cadenas de carbono y su longitud, cuando predominan los ácidos grasos de cadena corta, las grasas suelen ser más “suaves” con bajos puntos de fusión, comparadas a las que tienen ácidos grasos de cadena larga. Por ejemplo, los aceites de palma tienen su punto de fusión en rangos de 27 – 45 °C, mientras que el aceite de coco tiene un rango de 23 – 26 °C (Sharma et al., 2022). Esta naturaleza química de las grasas y aceites hace que su presencia en sistemas de alcantarillado ocasione problemas de taponamientos, por la formación de depósitos.

Tabla 2
Grasas presentes en la dieta moderna

Tipo de grasa	Saturada	Monoinsaturada	Poliinsaturada	Trans*
Nombres coloquiales	Grasa “mala”	Grasa “buena”	Grasa “buena”	Grasa “mala”
Química	Sin dobles enlaces	Con un doble enlace	Dos o más dobles enlaces	
Fuentes	- Grasa de la carne - Leche entera, queso, crema, mantequilla - Productos horneados (panqueques, pasteles) - Comida rápida frita - Aceite de palma y de coco	- Aguacate, nueces (cacahuates, almendras, avellanas y cremas de nueces) - Margarina para untar (a base de aceites de canola u oliva) - Aceites de canola, oliva y maní	- Pescado y mariscos - Margarina poliinsaturada - Aceites vegetales (aceites de soya, girasol, maíz y cártamo) - Nueces de Brasil y semillas	- Pies, galletas, pasteles, tartas, comidas fritas, leche, queso, cortes de res y cordero

Nota. *Las grasas trans únicamente se forman de manera natural en el estómago de las ovejas y vacas, por lo que están presentes en pequeñas cantidades en la leche, y en cortes de res y cordero. Fuente: Sharma et al., (2022).

De acuerdo a la Tabla 2, se puede señalar que la agrupación coloquial de los grupos de grasas presentes en los alimentos es únicamente referida como “mala” por su relación a problemas a la salud (metabólicos o cardiovasculares), cuando la dieta diaria se basa en un consumo abusivo de estos alimentos. Incluir las grasas y aceites en la dieta es necesario, ya que son parte esencial de componentes celulares y procesos metabólicos, pero es importante señalar que, aunque la mayoría tenga un origen “natural”, es importante moderar su consumo y consumir otros alimentos de origen vegetal y animal.

En este contexto se pueden señalar cinco grandes grupos de GYAs de importancia en la dieta humana, los cuales se ilustran en la Tabla 3.

Tabla 3
Grupos principales en las grasas y aceites

Grupo	Descripción
Ácidos grasos libres	Ácidos carboxílicos con cadenas largas de hidrocarburos. Se presentan en su forma esterificada como mayor componente de los lípidos. Los más comunes tienen en su cadena de 8 a 22 átomos de carbono, y tienen una o más insaturaciones (dobles enlaces). En restaurantes, los ácidos grasos libres representan un 15% de concentración en sus efluentes, bajando el pH del agua.
Triacil-glicerol	Los ácidos Grass se presentan generalmente como ésteres de glicerol, conocidos como triglicéridos. Son no polares e insolubles en agua. Las grasas y aceites son mezclas complejas de triacilgliceroles, cuya composición varía dependiendo del organismo de origen; animal o vegetal.
Ceras de éster	Las ceras incluyen varios tipos de compuestos de cadena media y larga, incluyendo hidrocarburos (TCH_3), alcoholes ($R-CH_2OH$), aldehídos ($R-CHO$), ácidos ($R-COOH$), y ésteres ($R-COOR'$). Existen ceras de origen vegetal y animal.
Fosfolípidos	La naturaleza anfifílica de los fosfolípidos les proporcionan propiedades de interés en la industria farmacéutica, cosmética y alimenticia. Aunque estos compuestos son retirados en la refinación de los aceites, parte de ellos terminan siendo parte de las mezclas en las GYAs en el tratamiento de agua.
Esteroles y ésteres de esteroles	Estrictamente hablando, los esteroides no son lípidos, por ejemplo, el colesterol, pero tienen propiedades físicas similares a las grasas y aceites. Estos pueden ser esterificados a ácidos grasos de cadena larga mediante reacciones de oxidación, de ahí que también se agrupen junto a los demás compuestos que forman las GYAs en el agua residual.

Nota. Elaborada con información de Husain et al., (2014).

En la Tabla 3 se pueden señalar las principales características que tienen las GYAs presentes en alimentos base de la dieta humana. Como se ha mencionado anteriormente, en las cocinas de los hoteles se producirán en cantidades considerables residuos de los alimentos, y derivado de las actividades de limpieza de utensilios, o vertido directo de grasas y aceites, estos compuestos terminarán en las líneas de agua residual, que tendrán principalmente dos destinos, una planta de tratamiento de agua residual o un cuerpo de agua o suelo, permitiendo la reacción de estos compuestos con los que se encuentren en el agua.

REACCIONES QUÍMICAS RELACIONADAS A LA GYAs EN EL AGUA RESIDUAL

Husain et al., (2014) señalan detalladamente la naturaleza de las reacciones involucradas en el proceso de freír la comida, principalmente por el contenido de sales en los alimentos y la naturaleza de los radicales libres en los aceites de cocina.

Los ácidos grasos libres son químicamente activos y fácilmente se saponifican en presencia de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio, los cuales actúan como fuertes agentes generadores de jabón metálico. El sodio y el potasio se encuentran de manera natural en los alimentos crudos, y al freírlos algunos iones de sodio pueden ser extraídos por los ácidos grasos libres presentes en los aceites para freír, formando oleato de sodio (jabones de sodio). El oleato de sodio reduce la tensión superficial entre el aceite de freír y la delgada capa de agua en la superficie de la comida frita, provocando la migración de los lípidos polares desde el aceite de freír a la comida frita. Además, los jabones de sodio estimulan la formación de espuma del aceite para freír y esto acelera la oxidación. La reacción de oxidación que es provocada por el calor, metales ligeros y pesados, es una cadena de reacciones radicales que ocurren de una manera rápida durante la fritura de la comida.

Primero, los radicales libres peroxi-, alcoxi- y alquilo- del aceite reaccionan con el oxígeno o RH (véase Ecuación 1)



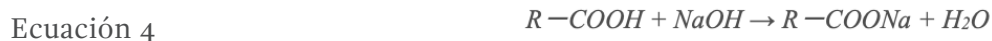
La reacción es iniciada con el ataque en el grupo alquilo del aceite, seguido de una reacción en cadena, que resulta en un grupo hidroperóxido (-OOH) en la cadena (véase Ecuación 2).



Los hidroperóxidos resultantes, vuelven a reaccionar por la combinación de dos radicales para formar aldehídos, cetonas y ácidos grasos (véase Ecuación 3).



Estas reacciones durante la fritura de los alimentos generan ácidos grasos libres, generalmente encontrados en los aceites usados y forman parte del contenido de GYAs en el agua residual. Posteriormente estos ácidos grasos libres reaccionarán con un álcali, como el hidróxido de sodio para formar jabón metálico (ver Ecuación 4).



Así mismo, las pequeñas cantidades de triacilgliceroles son saponificadas (hidrolizadas) formando jabones metálicos.



El sodio contribuye en la saponificación de las GYAs y producen jabón duro, el cual se deposita en pequeñas capas en las tuberías, provocando problemas de mantenimiento. El contenido de sodio puede incrementar en el agua residual debido al uso de sal en la preparación de los alimentos, pero también los detergentes y sanitizantes contienen grandes cantidades de hidróxido de sodio (NaOH), el cual es un catalizador alcalino fuerte, que potencializa las reacciones de saponificación (Sultana et al., 2024a). Otro elemento relevante es el calcio, ya que sus iones (Ca^{2+}) y los ácidos grasos libres también realizan reacciones de saponificación, formando jabones de calcio. Esta reacción está influenciada principalmente por la temperatura y el pH, y las fuentes de los reactivos que afectan significativamente la fuerza, la apariencia, las cantidades y propiedades fisicoquímicas de los depósitos de GYAs en las tuberías (Sultana et al., 2024a; Yusuf et al., 2023).

El agua residual proveniente de las cocinas y restaurantes de los hoteles son aguas ricas en contenido orgánico, debido al contenido de GYAs, pero la composición de estos será diversa por el tipo de menú que se maneje, además de otros factores como las prácticas de limpieza en cocina (cantidad de agua utilizada, separación de sólidos, uso de lavavajillas y productos de limpieza, etc.) (Gurd et al., 2019). El problema de las GYAs puede escalar a problemas de mantenimiento debido a taponamientos de tuberías, pero también impactar negativamente en el proceso de tratamiento de agua, debido a todos los compuestos derivados de las reacciones de las GYAs que tuvieron lugar en el sistema de colección de agua.

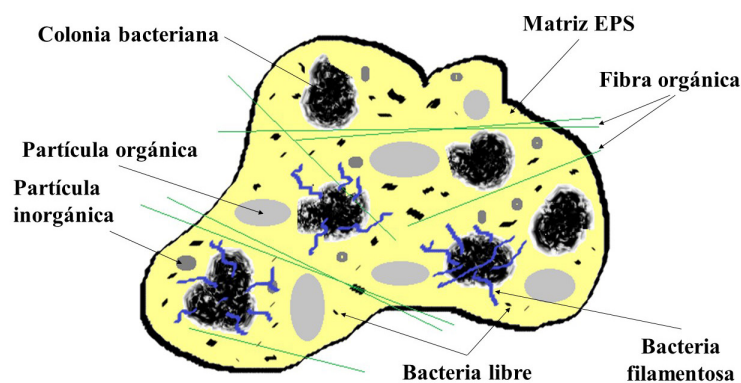
SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Típicamente, los sistemas de tratamiento de agua residual son aquellos procesos en donde los sólidos del agua residual son parcialmente removidos y/o transformados mediante la descomposición de sólidos orgánicos complejos y

degradables, a compuestos orgánicos relativamente estables o mineralizados (Sonune & Ghate, 2004). Los procesos de tratamiento de agua residual pueden variar dependiendo del tipo de agua a tratar, pero de acuerdo a las características del agua residual en hotelería, uno de los más comunes son los tratamientos biológicos convencionales, donde se utilizan microorganismos en lugar de químicos para remover los contaminantes presentes en el agua residual, con estos métodos se pretende reducir la acumulación de químicos y prevenir la eutrofización en los cuerpos de agua (Schaidler et al., 2017; von Sperling, 2007).

En los sistemas biológicos de tratamiento de agua residual la mayoría de los microorganismos se encuentran en forma de agregados microbianos, como floc de lodo, biopelículas y gránulos. Esto gracias a sustancias poliméricas extracelulares (EPS por sus siglas en inglés), un complejo de polímeros de alto peso molecular, que ha sido observado en estos medios (Sheng et al., 2010). La presencia de los EPS influye en las propiedades fisicoquímicas de los agregados microbianos, incluyendo estructura, carga superficial, floculación, propiedades de sedimentación, absorción y deshidratación (Sheng et al., 2010).

Los procesos de lodos activados son ampliamente utilizados en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), donde se cuentan con unidades de aireación, las cuales son utilizadas para la conversión de los compuestos orgánicos solubles en sólidos sedimentables, seguido de procesos de clarificación, generalmente tanques en donde se separan los sólidos del líquido (Arcos A., 2013; Deepnarain et al., 2020). Idealmente, los procesos aeróbicos son capaces de convertir las moléculas orgánicas en CO_2 , H_2O , nutrientes inorgánicos (N, P), biomasa y otros productos como los EPS. En los lodos activados, la estructura del floc varía de acuerdo con diferentes factores, pero comúnmente está formado por colonias de bacterias rodeadas por una red extracelular de EPS, además, el floc puede incluir fibras orgánicas y partículas inorgánicas como se observa en la Figura 1 (Alrhoun, 2014).



Nota. Elaboración propia con datos de (J. Guo et al., 2014; Shchegolkova et al., 2016)

Figura 1. Estructura general del floc en los lodos activados

Es común encontrar bacterias filamentosas en el floc de lodo activado, las cuales pueden proporcionar una estructura de soporte en la forma tridimensional del floc (Figuroa et al., 2015; Pacheco Salazar et al., 2003). Así mismo se pueden observar protozoarios unicelulares como flagelados, amebas y ciliados, así como organismos complejos como los metazoos (rotíferos), nematodos y algunos gusanos, que son parte de los sistemas de lodos activados (Curds, 1973; Isac et al., s/f; Martin-Cereceda et al., 1996). La eficiencia en la sedimentación es crucial en PTAR con lodos activados, y gobierna el potencial y la capacidad de todo el sistema de tratamiento. Técnicamente, las propiedades de sedimentación del lodo son descritas mediante el índice volumétrico de lodos (IVL), que expresa la cantidad (en mL) ocupada por un gramo de sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSTLM), generalmente en 1 L de muestra durante 30 minutos. Cuando el lodo activado tiene valores de IVL sobre 150 mL/g se puede señalar como lodo con ‘bulking’ (del inglés abultado), el cual obstaculiza todo el proceso de lodos activados (Deepnarain et al., 2020; Torrescano España, 2009).

MICROORGANISMOS FILAMENTOSOS EN LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

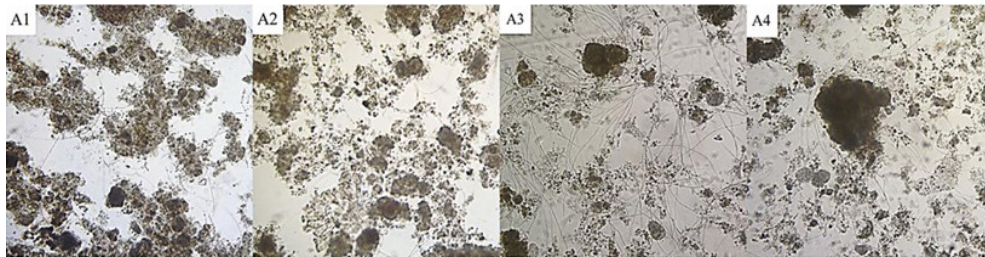
El crecimiento excesivo de bacterias filamentosas es asociado con problemas de sedimentación y formación de espuma (*foaming* en inglés). El bulking de lodo es caracterizado por un crecimiento de bacterias filamentosas en los alrededores del medio líquido del floc, inhibiendo la formación de segregados densos, mientras que el foaming es causado por los flocs de lodo que flotan a la superficie del medio acuoso, segregándose en una capa de lodo relativamente estable en la interfaz agua-aire (Alrhoun, 2014). En la Figura 2 se ilustra un ejemplo de foaming.



Nota. Nilsson, (2015).

Figura 2. Ejemplo de foaming en un sistema de tratamiento biológico convencional

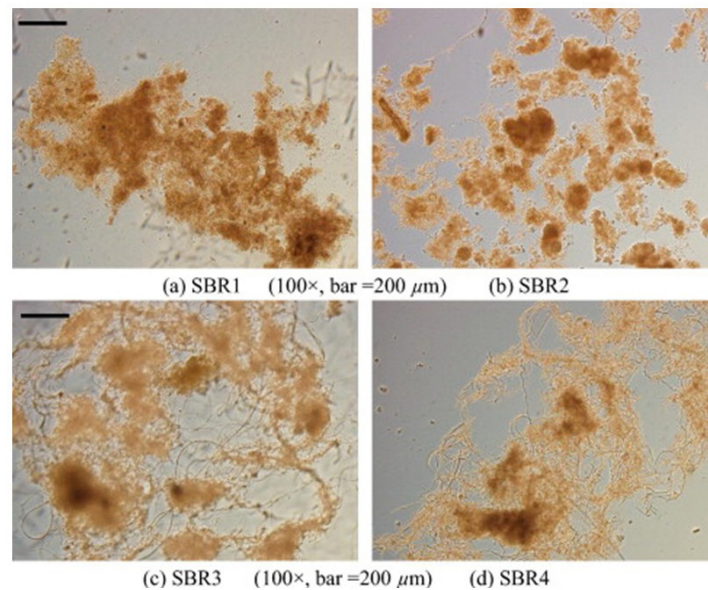
A nivel microscópico, el bulking se puede identificar cuando el floc presenta características dispersas, sin agregación y se observan los microorganismos filamentosos alrededor del floc (J. Guo et al., 2014). En su estudio, Yao et al., (2019) ilustra detalladamente cuando el lodo presenta bulking filamentoso, en la Figura 3, se observan muestras de un floc regular (Fig.3 A1 y A2) y otro con características de bulking filamentoso (Figura 3 A3 y A4).



Nota. Editado de Yao et al., (2019).

Figura 3. Vista de tipos de floc al microscopio (100x)

Por otra parte Guo et al., (2014) analizó el floc de rectores por lotes en secuencia (SBR, del inglés Secuenced Batch Reactor) a nivel laboratorio. En la Figura 4 se pueden observar las diferencias entre un floc regular y un floc con presencia de microorganismos filamentosos.



Nota. SBR; Sequenced Batch Reactor. Fuente: editado de Guo et al., (2014).

Figura 4. Observación de floc en reactores tipo batch

En la Figura 4 (a y b) se pueden observar flocs considerados como deseables en un buen sistema de tratamiento de agua, mientras que en la Figura 4 (c y d) se muestra un floc característico con presencia de microorganismos filamentosos. Guo y su equipo de colaboradores reportaron que en los reactores que presentaron floc filamentosos, el efluente tuvo DQO por encima de los 100 mg/L. El arrastre de sólidos y la baja calidad del efluente son los resultados de tener un lodo con bulking, esto es respaldado por otros estudios, señalando a los problemas de bulking filamentosos como de los más importantes en los procesos biológicos convencionales de lodos activados (Aonofriesei & Petrosanu, 2007; Lu et al., 2023; Nilsson, 2015).

En la literatura se señalan diversos microorganismos filamentosos causantes del bulking. La bacteria de azufre del tipo 021N y *Thiothrix* spp., son capaces de utilizar sustratos orgánicos y compuestos reducidos de azufre como fuentes de energía, junto con bacterias heterotróficas adaptadas a lodos que reciben altas cargas orgánicas (relaciones “AM” Alimento/Microorganismo > 0.15 Kg de DBO₅ Kg⁻¹ SSTLM día⁻¹), por ejemplo, *Sphaerotilus* spp. y *Haliscomenobacter hydrossis*. Además, se tienen identificadas a especies como *Microthrix parvicella*, tipo 1701, *Gordonia* spp. y tipo 0041 por ser las responsables de eventos de bulking filamentosos (Alrhoun, 2014; Aonofriesei & Petrosanu, 2007; Bjo et al., 2002; Deepnarain et al., 2020; Nilsson, 2015).

La proliferación de los microorganismos filamentosos se debe a parámetros relacionados con la operación como la concentración baja de oxígeno, relación AM alta, deficiencias de N y P, bajo pH, DBO residual soluble y las altas concentraciones de grasas y aceites (G. Liu et al., 2018; Pacheco Salazar et al., 2003). En este contexto se puede señalar que la presencia de GYAs en las ARH potencian los problemas por bulking filamentosos en los tratamientos biológicos convencionales, debido a las características fisicoquímicas analizadas previamente, las aguas provenientes de cocinas y restaurantes presentan pH bajo, además de que se genera competencia por el oxígeno disuelto en los sistemas aeróbicos entre las GYAs y los microorganismos que requieren dicho elemento para sus procesos de respiración (Cabrera Acevedo, 2011; Nilsson, 2015).

PANORAMA DEL AGUA RESIDUAL DE LOS HOTELES EN EL CARIBE MEXICANO

En infraestructura, de acuerdo con el Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (Comisión Nacional del Agua, 2022), Quintana Roo cuenta con 29 plantas municipales de tratamiento de agua, pero no se tiene información referente a cuántos hoteles

están conectados a la red de alcantarillado municipal para enviar sus aguas residuales a estas plantas, o si cuentan con sus propias plantas de tratamiento.

En materia de agua residual, la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Quintana Roo, en su artículo 129 establece que, “cuando no existan sistemas municipales para la evacuación de las aguas residuales municipales, los propietarios de hoteles, fraccionamientos, condominios, residencias, industrias y similares, deberán instalar sistemas de tratamiento y reciclaje de sus aguas residuales, ya sean individuales o comunales, para satisfacer las condiciones particulares que determinen las autoridades competentes” (Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Quintana Roo, 2018). En este sentido, los hoteles que se encuentran ubicados en el caribe mexicano, que estén en el territorio del estado de Quintana Roo, están obligados a tener en sus instalaciones una PTAR. De acuerdo con lo investigado por Biosilva A. C., (2015), los hoteles que cuentan con infraestructura de tratamiento de agua residual son operados por personal interno o por empresas autorizadas, pero estos hoteles enfrentan retos importantes en la operación de sus plantas de tratamiento que, como se ha expuesto, los procesos biológicos convencionales son susceptibles de ser ineficientes debido a las delicadas condiciones de operación.

Las deficiencias de oxígeno disuelto en los sistemas biológicos, por exceso de GYAs y microorganismos filamentosos, desembocan en un aumento en el consumo de energía, debido al aumento en el uso de aireadores, sopladoras etc.

También se originan problemas en la gestión de los biosólidos generados en el proceso, iniciando con un aumento de concentración de lodo (SSTLM) en los tanques de aireación, que posteriormente requieren mayores purgas (retiro en volumen de lodo del sistema) para mantener los niveles óptimos de concentración de SSTLM * m³ ⁻¹ en los biorreactores, y de esta forma poder mejorar la disolución de oxígeno para que la calidad del agua tratada no se vea comprometida. Esta sobreproducción de lodo se traducirá en una mayor demanda de insumos utilizados en el proceso de deshidratado (floculantes y coagulantes), y complicaciones en el almacenamiento, retiro y disposición final de los biosólidos (Flores-Alsina et al., 2009; J. H. Guo et al., 2010; Y. Liu et al., 2020).

En la Figura 5, se ilustra el panorama general de la situación actual del Caribe mexicano analizada en este texto. Esta interrelación de componentes, llevan a un posible escenario; el desequilibrio ambiental, aumento en los riesgos a la salud pública y una menor disponibilidad de agua.



Figura 5. Escenario general del caribe mexicano y sus retos ambientales

La protección al medio ambiente y la salud pública es el principal objetivo para regular las descargas de aguas residuales de los hoteles, debido a que estas representan un riesgo alto de enfermedades, principalmente las patógenas, y también causan un impacto negativo en los ecosistemas. Las ARH sin tratamiento contienen bacterias, virus y parásitos que pueden causar infecciones gastrointestinales y respiratorias, entre otras. El riesgo incrementa cuando los puntos de las descargas de aguas residuales se encuentran en los siguientes puntos:

- Zonas agrícolas; ya que las fuentes de agua para irrigación pueden estar contaminadas, y de esta manera alcanzar los cultivos (Werneck et al., 2017).
- Zonas costeras o con ríos, arroyos, lagos etc.; estas áreas son nicho ecológico de diversas especies, cuya posición en la cadena trófica permite que los contaminantes a los que estén expuestos alcancen al ser humano (ONU, 2017).

Los efectos de la contaminación de las aguas residuales son más graves en grupos vulnerables, ya sea por la edad; niños y lactantes, así como los adultos mayores son más susceptibles a las enfermedades, además de las personas con enfermedades crónicas o discapacidad. Sin mencionar que, en poblaciones con vulnerabilidad económica, el acceso a agua potable y una buena nutrición, desencadenan situaciones de salud que, al añadir el factor “contaminación”, suponen escenarios desafiantes para un sistema de salud pública ya saturado (ONU, 2017).

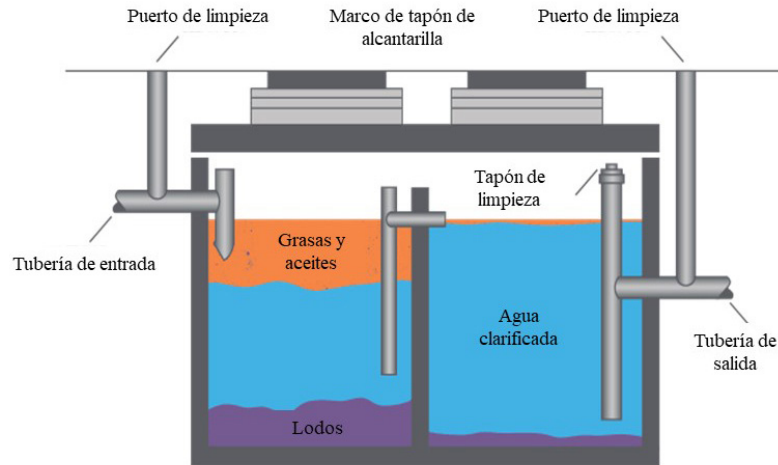
La zona del Caribe cuenta con un suelo cárstico, con formaciones de cavernas, cenotes, y ríos subterráneos, lo que expone fácilmente a los cuerpos de agua subterráneos a la contaminación por descargas de agua residual, que transporta enfermedades a toda la fauna y flora (acuática y terrestre) que se encuentre cercana a los sitios de descarga, de la mano con la eutrofización

en los cuerpos superficiales y subterráneos de agua que reciben altas concentraciones de materia orgánica. Los problemas anteriores empeoran el paisaje natural, principalmente en zonas donde la explotación económica es el paisaje, como lo es el turismo en esta zona (Biosilva A. C., 2015).

Las empresas hoteleras deben de tomar las medidas necesarias para mejorar su infraestructura de tratamiento de agua, reducir el consumo de agua y mejorar sus prácticas en producción de alimentos y limpieza en sus cocinas, con la meta de reducir gastos de operación y mantenimiento de sus instalaciones y sus sistemas de tratamiento de agua, todo sin perder el objetivo de cumplir con las demandas que exige la normatividad mexicana en materia de agua residual, cuya finalidad es preservar la integridad del ecosistema, del cual dependen directamente. Las tecnologías disponibles en el tratamiento de agua residual son diversas, pero que sean eficientes y costeables para el sector hotelero, se identificaron dos principales, y se presentan en este contexto como la ventana de oportunidad para resolver los problemas que las ARH representan.

TECNOLOGÍAS PARA ENFRENTAR LAS GRASAS Y ACEITES

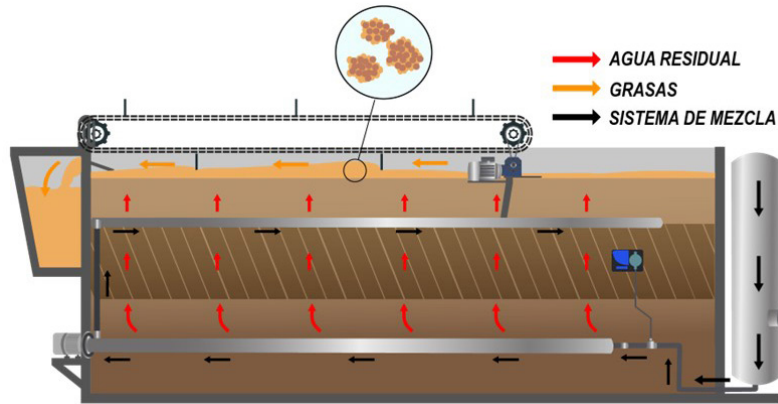
De las tecnologías más comunes y adecuadas son los interceptores de grasas, los cuales se instalan en los restaurantes y cocinas, para impedir que las grasas y aceites terminen en los tanques de captación de aguas residuales, tuberías y al final en la PTAR. Típicamente un interceptor de grasas es un dispositivo instalado en el sistema hidráulico para atrapar o interceptar las grasas y aceites del agua. El fundamento es la separación física, mientras que el agua residual se enfría, las GYAs se endurecen y los sólidos de los alimentos se asientan y forman lodos. El agua sin GYAs y sólidos sedimentables avanza a compartimentos posteriores y sigue su flujo hasta llegar a los sistemas de tratamiento (Sultana et al., 2024b; Yusuf et al., 2023). En la Figura 6 se ilustra un esquema general de un interceptor de grasas.



Nota. Liquid Environmental Solutions, (s/f)

Figura 6. Esquema de un sistema interceptor de grasas

La desventaja principal de un interceptor de grasas es que se requiere del retiro constante de los materiales que este dispositivo atrapa, o de lo contrario terminarán en el sistema hidráulico y en los sistemas de tratamiento de agua. Este problema se soluciona al contar con una cartera de proveedores que se especialicen en el retiro de estos residuos, ya que, generalmente en los hoteles no hay espacios diseñados para el tratamiento de sólidos. La mayor ventaja de estos interceptores es que maneja mayores caudales que las trampas de grasa convencionales, y son ideales para el sector hotelero que demanda la elaboración de grandes cantidades de alimentos, y en consecuencia la limpieza de material de cocina en poco tiempo. Por otro lado, los sistemas de flotación por aire disuelto o DAF (del inglés Dissolved Air Flotation) son equipos que separan partículas sólidas, como las GYAs, diseñados para clarificación de aguas residuales de tipo industrial y urbano. El proceso de separación es un método fisicoquímico en donde se aplican coagulantes y micro o nano burbujas de aire para separar sólidos en la superficie de agua. Es muy eficiente y utilizando los parámetros de operación adecuados la remoción de SST y GYAs puede llegar al 90%, mientras que la reducción de DBO y DQO alcanzan de un 40 a 55% (Palaniandy et al., 2010; Penetra et al., 1999; Rattanapan et al., 2011). Este sistema mejora el proceso de tratamiento de aguas convencionales al minimizar la carga orgánica que recibirán los biorreactores, cuyos beneficios inmediatos serán una mayor disolución del oxígeno y menor aparición de microorganismos filamentosos, que resultará en un mejor clarificado del agua residual tratada, la cual podrá ser reincorporada al medio sin complicaciones. En la Figura 7 se ilustra un esquema general del funcionamiento de un DAF.



Nota. (Synertech Water Resources, s/f).

Figura 7. Esquema general de un DAF

Como se observa en la Figura 7, las grasas se colectan en la parte superior y son separadas del agua para darle otro tratamiento. Los DAF sobresalen de otras tecnologías debido a su atractivo bajo costo en mantenimiento y consumo energético, y esto se pueden adaptar para que las grasas colectadas se envíen a cárcamos de digestión de grasas, y dependiendo de la especialización de las instalaciones, se podría generar biogás (por métodos anaerobios), o simplemente mezclar la grasa digerida con las purgas de los lodos para que terminen en el proceso de deshidratación de lodos.

La tecnología en la ingeniería de aguas residuales ofrece diferentes opciones para abordar problemáticas, derivadas de aguas residuales con exceso de grasas y aceites, en los procesos biológicos convencionales, pero, de manera estratégica se puede enfrentar la situación. Una de estrategia es capacitar al personal involucrado en el proceso de preparación de comida (Chefs, cocineros) y limpieza en las cocinas (ayudantes, stewards), implementando métodos de separación y recuperación de aceites, los cuales se pueden revalorizar de diferentes maneras. Otra forma y quizá la más compleja, es que la población en general apueste por reducir el consumo de alimentos fritos o que incluyan altos contenidos de grasas y aceites, esto, a gran escala representaría una mejora en hábitos alimenticios, disminución de enfermedades cardio vasculares e incluso el sobre peso.

CONCLUSIONES

Como país en desarrollo, México tiene en el caribe una ventana de oportunidad para ser líder en el sector hotelero a nivel mundial, pero al mismo tiempo tiene un reto importante en mantener el equilibrio entre el aprovechamiento y la conservación de sus recursos naturales, específicamente el agua. En este escrito se pudo identificar las características del agua residual

hotelera, así mismo se subrayó que los problemas principales que estas acarrearán a los sistemas de tratamiento de agua residual; el bulking filamentoso, el cual hace difícil la operación de los sistemas biológicos convencionales. Se señaló a los interceptores de grasa y los DAF como tecnologías funcionales para disminuir de manera directa la concentración de grasas y aceites a la entrada de los sistemas de tratamiento de agua. Sin dejar de lado las estrategias de capacitación y concientización al personal y a los consumidores para que en conjunto se asegure la calidad en los sistemas de tratamiento de agua residual, y al mismo tiempo mantener un balance entre aprovechamiento y conservación del agua.

REFERENCIAS

- Abdul Khader, S., & Chinnamma, M. A.** (2021). Design of a sewage treatment plant for a hotel complex. *International Research Journal of Engineering and Technology*. <https://www.irjet.net>
- Alrhoun, M.** (2014). Hospital wastewaters treatment: Upgrading water systems plans and impact on purifying biomass. *TEL Archives*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01133490>
- Anofriesei, F., & Petrosanu, M.** (2007). Activated sludge bulking episodes and dominant filamentous bacteria at wastewater treatment plant Constanta Sud (Romania). *Proceedings of the Romanian Academy, Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science*, 2, 83–87.
- Arcos, A. Y.** (2013). Microbiología de lodos activados. *Hechos Microbiológicos*, 4(2), 117–122. <http://www.udea.edu.co/hm>
- Biosilva, A. C.** (2015). *Diagnóstico del manejo de las aguas residuales en Puerto Morelos, Quintana Roo*.
- Bjo, L., Hugenholtz, P., Tyson, G. W., & Blackall, L. L.** (2002). Filamentous Chloroflexi (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal. *Microbiology*, 148. <https://www.arb-home.de>
- Cabrera Acevedo, A.** (2011). Propuesta de reutilización del efluente de la planta de tratamiento Tryp Península en fuentes ornamentales y espejos de agua de los hoteles ubicados en el sector Punta Hicacos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5(1).
- Comisión Nacional del Agua.** (2022). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-oficiales/10-inventario-nacional-de-ptars.pdf>
- Curds, C. R.** (1973). The role of protozoa in the activated-sludge process. *Integrative and Comparative Biology*, 13(1), 161–169. <https://academic.oup.com/icb/article/13/1/161/1992162>
- Deepnarain, N., Nasr, M., Kumari, S., Stenström, T. A., Reddy, P., Pillay, K., & Bux, F.** (2020). Artificial intelligence and multivariate statistics for comprehensive assessment of filamentous bacteria in wastewater treatment plants experiencing sludge bulking. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100853>
- Estévez, S., Feijoo, G., & Moreira, M. T.** (2022). Environmental synergies in decentralized wastewater treatment at a hotel resort. *Journal of Environmental Management*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115392>
- FAO.** (s.f.). *Wastewater treatment*. (17 de abril de 2018), <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm>

- Figueroa, M., Val Del Río, A., Campos, J. L., Méndez, R., & Mosquera-Corral, A.** (2015). Filamentous bacteria existence in aerobic granular reactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38(5), 841–851. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1327-x>
- Flores-Alsina, X., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Gernaey, K. V., & Rosen, C.** (2009). Including the effects of filamentous bulking sludge during the simulation of wastewater treatment plants using a risk assessment model. *Water Research*, 43(18), 4527–4538. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2009.07.033>
- FONATUR.** (2018, junio 25). Tratamiento de aguas residuales Cancún, Q. Roo. *Fondo Nacional para el Fomento al Turismo*. <https://www.gob.mx/fmt/acciones-y-programas/tratamiento-de-aguas-residuales-162728>
- Guo, J. H., Peng, Y. Z., Peng, C. Y., Wang, S. Y., Chen, Y., Huang, H. J., & Sun, Z. R.** (2010). Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen. *Bioresource Technology*, 101(4), 1120–1126. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.09.051>
- Guo, J., Peng, Y., Wang, S., Yang, X., & Yuan, Z.** (2014). Filamentous and non-filamentous bulking of activated sludge encountered under nutrients limitation or deficiency conditions. *Chemical Engineering Journal*, 255, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.075>
- Gurd, C., Jefferson, B., & Villa, R.** (2019). Characterization of food service establishment wastewater and its implication for treatment. *Journal of Environmental Management*, 252, 109657. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109657>
- Husain, I. A. F., Alkhatib, M. F., Jami, M. S., Mirghani, M. E. S., Zainudin, Z. Bin, & Hoda, A.** (2014). Problems, control, and treatment of fat, oil, and grease (FOG): A review. *Journal of Oleo Science*, 63(8), 747–752. <https://doi.org/10.5650/jos.ess13182>
- International Hotel Consulting Services** (2022). *Sector hotelero en México en 2022 y perspectivas de futuro - IHCS*. <https://www.ihcshotelconsulting.com/es/blog/sector-hotelero-en-mexico-en-2022-y-perspectivas-para-el-futuro/>
- Isac, L., Rodríguez, E., Salas, M. D., & Fernández, N.** (s.f.). *Protozoos en el fango activo*. https://bibliotecagbs.com/archivos/089_156_CAPficha_PROTOZOOS.pdf
- Khoury, D., Millet, M., Jabali, Y., & Delhomme, O.** (2023). Fog water: A general review of its physical and chemical aspects. *Environments*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/environments10120224>
- Klaucans, E., & Sams, K.** (2018). Problems with fat, oil, and grease (FOG) in food industry wastewaters and recovered FOG recycling methods using anaerobic co-digestion: A short review. *Key Engineering Materials*, 762, 61–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.762.61>

- Leader, J. W., Reddy, K. R., & Wilkie, A. C. (2005).** Optimization of low-cost phosphorus removal from wastewater using co-treatments with constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 51(9), 283–290. <https://soils.ifas.ufl.edu/wetlands/publications/PDF-articles/291.Optimization%20of%20low-cost%20phosphorus%20removal%20from%20wastewater%20using%20co-treatments%20with%20constructed%20wetlands.pdf>
- Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Quintana Roo (2018).**
- Liquid Environmental Solutions (s.f.).** Grease trap vs. grease interceptor. (6 de junio de 2024), <https://www.liquidenviro.com/blog-news/grease-trap-vs-grease-interceptor>
- Liu, G., Wang, J., & Campbell, K. (2018).** Formation of filamentous microorganisms impedes oxygen transfer and decreases aeration efficiency for wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 189, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.125>
- Liu, Y., Yuan, L., Huang, S., Huang, D., & Liu, B. (2020).** Integrated design of monitoring, analysis, and maintenance for filamentous sludge bulking in wastewater treatment. *Measurement*, 155, 107548. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.107548>
- Lu, X., Yan, G., Fu, L., Cui, B., Wang, J., & Zhou, D. (2023).** A review of filamentous sludge bulking controls from conventional methods to emerging quorum quenching strategies. *Water Research*, 236, 119922. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119922>
- Martin-Cereceda, M., Serrano, S., & Guinea, A. (1996).** A comparative study of ciliated protozoa communities in activated-sludge plants. *PEMS Microbiology Ecology*, 21, 267–276. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1996.tb00123.x>
- Nilsson, F. (2015).** Application of ozone in wastewater treatment: For mitigation of filamentous bulking sludge & reduction of pharmaceutical discharge.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (2022).** Que establezca los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 (1998).** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0
- ONU. (2017).** *The United Nations world water development report 2017: Wastewater: The untapped resource; facts and figures*. <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247553e.pdf>

- Pacheco Salazar, V. F., Jáuregui Rodríguez, B., Pavón Silva, T. B., & Mejía Pedrero, G. V.** (2003). Control de crecimiento de microorganismos filamentosos en una planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(1), 47–53.
- Palaniandy, P., Adlan, M. N., Aziz, H. A., & Murshed, M. F.** (2010). Application of dissolved air flotation (DAF) in semi-aerobic leachate treatment. *Chemical Engineering Journal*, 157(2–3), 316–322. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2009.11.005>
- Penetra, R. G., Reali, M. A. P., Foresti, E., & Campos, J. R.** (1999). Post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage by dissolved-air flotation. *Water Science and Technology*, 40(8), 137–143. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00619-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00619-8)
- Pharmawati, K., Hidayatullah, D., & Wirasakti, P.** (2018). Identification The application of water conservation in hotel. *E3S Web of Conferences*, 73, 04019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187304019>
- Rattanapan, C., Sawain, A., Suksaroj, T., & Suksaroj, C.** (2011). Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation processes. *Desalination*, 280(1–3), 370–377. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2011.07.018>
- Sánchez Gonzáles, A.** (2022). Tratamiento de aguas residuales en el giro hotelero. *Flowen*. <https://flowen.com.pe/tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-giro-hotelero/>
- Santacruz de León, E. E., & Santacruz de León, G.** (2020). Consumo de agua en establecimientos hoteleros en México. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 29(1), 120–136. <https://www.redalyc.org/journal/1807/180762690008/html/>
- Schaider, L. A., Rodgers, K. M., & Rudel, R. A.** (2017). Review of organic wastewater compound concentrations and removal in onsite wastewater treatment systems. *Environmental Science and Technology*, 51(13), 7304–7317. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04778>
- Secretaría de Turismo.** (2022, abril 9). *Hotelería representa más del 75% de la inversión turística de México*. <https://www.gob.mx/sectur/prensa/hoteleria-representa-mas-del-75-de-la-inversion-turistica-de-mexico>
- SECTUR.** (2015, febrero 9). *Riviera Maya*. <https://www.sectur.gob.mx/programas/gestion-de-destinos/productos-turisticos/mundo-maya/riviera-maya/>
- SECTUR.** (2023, febrero 7). *El Caribe Mexicano llega a Punto México en Sectur con su riqueza artesanal, gastronómica y turística*. <https://www.gob.mx/sectur/prensa/el-caribe-mexicano-llega-a-punto-mexico-en-sectur-con-su-riqueza-artesanal-gastronomica-y-turistica-325722?idiom=es>
- SEDETUR-QR.** (2022). *Indicadores Turísticos Ene-Dic 2022*. <https://sedetur-qroo.gob.mx/ARCHIVOS/indicadores/Indicador-Tur-EneDic-2022.pdf>

- Sharma, S. K., Barthwal, R., Saini, D., & Rawat, N. (2022).** Chemistry of food fats, oils, and other lipids. En *Advances in Food Chemistry: Food Components, Processing and Preservation* (pp. 209–254). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_6
- Shchegolkova, N. M., Krasnov, G. S., Belova, A. A., Dmitriev, A. A., Kharitonov, S. L., Klimina, K. M., Melnikova, N. V., & Kudryavtseva, A. V. (2016).** Microbial community structure of activated sludge in treatment plants with different wastewater compositions. *Frontiers in Microbiology*, 7, 90. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00090>
- Sheng, G. P., Yu, H. Q., & Li, X. Y. (2010).** Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. En *Biotechnology Advances*, 28(6), 882–894. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.001>
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004).** Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>
- Statista. (2024, abril 30).** *La industria hotelera en México – datos estadísticos*. <https://es.statista.com/temas/7891/la-industria-hotelera-en-mexico/#topicOverview>
- Sultana, N., Roddick, F., Jefferson, B., Gao, L., Bergmann, D., Papalois, J., Guo, M., Tzimourtas, K., & Pramanik, B. K. (2024a).** Effectiveness of grease interceptors in food service establishments for controlling fat, oil, and grease deposition in the sewer system. *Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169441>
- Sultana, N., Roddick, F., Jefferson, B., Gao, L., Bergmann, D., Papalois, J., Guo, M., Tzimourtas, K., & Pramanik, B. K. (2024b).** Effectiveness of grease interceptors in food service establishments for controlling fat, oil and grease deposition in the sewer system. *The Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.169441>
- Synertech Water Resources. (s.f.).** Sistema de flotación por aire DAF. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://www.nyfdecolombia.com/aguas-residuales/sistema-de-flotacion-por-aire-disuelto-daf>
- Torrescano España, J. L. (2009).** Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual. *Aquaforum*, 52.
- von Sperling, M. (2007).** *Wastewater characteristics, treatment and disposal* (Vol. 1). IWA Publishing.
- Werneck, L. M. C., Vieira, C. B., Fumian, T. M., Caetano, T. B., Emilio dos Santos, J., Ferreira, F. C., Pimenta, M. M., & Miagostovich, M. P. (2017).** Dissemination of gastroenteric viruses in the production of lettuce in developing countries: A public health concern. *FEMS Microbiology Letters*, 364(9), 1–10. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx085>

- Yao, J., Liu, J., Zhang, Y., Xu, S., Hong, Y., & Chen, Y. (2019).** Adding an anaerobic step can rapidly inhibit sludge bulking in SBR reactor. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47304-3>
- Yusuf, H. H., Roddick, F., Jegatheesan, V., Gao, L., & Pramanik, B. K. (2023).** Tackling fat, oil, and grease (FOG) build-up in sewers: Insights into deposit formation and sustainable in-sewer management techniques. En *Science of the Total Environment*, 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166761>