

Breve revisión del uso de microalgas para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales

A Brief Review About the Use of Microalgae for Degrading Emerging Pollutants in Wastewater

Juan Andrés Sandoval^{a, d}, Miguel Alfonso Morales-Granados^b, Diego Rubio^c

RESUMEN

Los tratamientos convencionales no remueven de forma eficiente los contaminantes emergentes en aguas residuales. Esto ha motivado la investigación en nuevas tecnologías con microalgas. Este trabajo expone una breve revisión del tema, partiendo de la definición, clasificación y efectos de estas sustancias; los tratamientos con microalgas, los mecanismos y los porcentajes de remoción para algunos contaminantes emergentes. Se busca que la información expuesta acá, sirva de base para futuros trabajos en nuestro país que incorporen microalgas como medio para remover contaminantes emergentes en agua.

PALABRAS CLAVE: tratamiento de aguas residuales; conservación del recurso hídrico; biorremediación; microalgas; calidad del agua.

ABSTRACT

Conventional treatments do not cope with removing efficiently emerging compounds from wastewater. This situation has motivated the investigation in new technologies with microalgae. This paper presents a brief review of the topic, since the definition, classification, and effects of these emerging compounds; the microalgae treatments; the mechanisms and the remove percentages from some emerging compounds. The information presented here is intended to be a help for future research in our country involving microalgae to remove emerging compounds from water.

KEYWORDS: wastewater treatment; water resource conservation; bioremediation; microalgae; water quality.

Introducción

Los contaminantes emergentes son sustancias no reguladas, de aparición reciente y hasta ahora se empiezan a conocer los posibles efectos nocivos para el medio ambiente (Patiño et al., 2014). Incluyen fármacos, productos de cuidado personal, plaguicidas, retardantes de llama, aditivos industriales, aditivos alimentarios, productos de estilo de vida y drogas ilícitas (Bravo, 2009). Sus efectos van desde

alteraciones en el sistema inmunológico de animales acuáticos hasta mutaciones en seres humanos. Aunque sus concentraciones son, casi en todos los casos, inferiores a microgramos por litro, su presencia aumenta día a día por la incapacidad de los tratamientos convencionales para removerlos (Barboza, 2015); y porque se liberan continuamente, lo que ha generado que se les llame “pseudo persistentes” (Ebele et al., 2017). Además, pueden acumularse

a Fundación Universidad de América, Ingeniería Química, Grupo de Procesos de Separación no Convencionales. Bogotá, Colombia. ORCID Sandoval, J.A.: 0000-0001-8957-1421

b Fundación Universidad de América, Ingeniería Mecánica, Grupo de diseño avanzado. Bogotá, Colombia. ORCID Morales Granados, M.A.: 0000-0003-3123-4902

c Fundación Universidad de América, Ingeniería Química. Bogotá, Colombia ORCID Rubio, D.: 0000-0003-0760-9567

d Autor de correspondencia: juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

Recepción: 10 de diciembre de 2019. Aceptación: 23 de abril de 2020



en la cadena trófica (Cartagena, 2001; Butkovskiy, 2015) y migrar hasta fuentes de aguas subterráneas, o depositarse en sedimentos (Hernández-Quiroz et al., 2019).

Los tratamientos convencionales fisicoquímicos o biológicos, como lagunas de estabilización o reactores anaerobios, además de no degradar totalmente la mayoría de estos compuestos, tienen altos tiempos de retención y generan lodos que deben ser tratados (Xie et al., 2012). Se han intentado procesos de oxidación avanzada, con buenos resultados, pero en algunos casos sus costos son elevados (Xiong et al., 2016), o generan subproductos más nocivos que los contaminantes principales (Sorensen et al., 2015, Jurado et al., 2016).

Por ello, la investigación para mejorar las eficiencias de tratamientos con microalgas ha crecido (Semple et al., 1999; Lima et al., 2004; Ghasemi et al., 2011; Subashchandrabose et al., 2013; Zhou et al., 2013; Matamoros et al., 2015 y 2016; Escapa et al., 2016 y 2017; Díaz-Garduño et al., 2017; Xiong et al., 2016 y 2017c). Dentro de sus conclusiones, en forma general, afirman que los parámetros a tener en cuenta son la tolerancia de la especie, las condiciones operacionales y los costos de manejo de biomasa y lodos generados (Camacho-Muñoz, 2012; Prócel et al., 2016).

Metodología

Para esta revisión se analizaron artículos y tesis con especial énfasis en publicaciones desde el año 2000 en adelante. Se buscó en bases de datos de Scopus, Researchgate y Google Scholar, clasificando la información según su relevancia, es decir número de veces que se ha citado. A partir de ello, se elaboró una clasificación de los contaminantes emergentes (CE); así como sus principales efectos sobre el medio ambiente y la salud humana; las tecnologías de tratamiento con microalgas más usadas para remover dichos contaminantes; y los mecanismos de remoción que emplean dichas microalgas. En el presente artículo de revisión se resume y discute dicha información, además de otros elementos como la distribución de los contaminantes emergentes y las posibles ventajas del uso de consorcios de microalgas. Por cuestiones de espacio, no se hablará de

todos los contaminantes orgánicos emergentes con sus concentraciones promedio ni máximas, ni de rutas de exposición, ni tampoco de todas las tecnologías posibles para eliminarlos.

Resultados

Clasificación de los contaminantes emergentes (CE)

Aunque la lista es larga y no definitiva, porque día a día salen más sustancias que pueden ser incluidas, la Tabla 1 presenta una división común a varios estudios.

Tabla 1. Grupos y compuestos representativos de contaminantes emergentes

| Grupo | Compuestos representativos |
|-------------------------------|---|
| Retardantes de llama | tris (cloro isopropil) fosfato tris (2-cloro etil) fosfato |
| Productos de cuidado personal | Jabones, detergentes, shampoo, acondicionador, bloqueador solar |
| Fármacos | Antibióticos Antiinflamatorios Antidepresivos Antiepilépticos Analgésicos Estrógenos |
| Pesticidas | Organoclorados Organofosforados |
| Productos de estilo de vida | Cafeína Nicotina |
| Drogas ilícitas | Anfetamina Cocaína Metanfetamina Heroína Morfina |
| Aditivos industriales | Surfactantes Humectantes Desinfectantes |

Distribución y concentración de los CE

En la actualidad, como ya los efectos de los CE se conocen muy bien, la investigación está enfocada en el destino de los CE en el medio ambiente, teniendo en cuenta su degradación en agua y suelo, la fotodegradación natural y la adsorción en plantas, entre otros factores (Banjac et al., 2015; Grill et al., 2016). También hay que tener en cuenta factores

adicionales, como el cambio climático que está afectando la distribución de los CE y sus productos de degradación (Keller et al., 2015). Pero el aumento de la dispersión en el medio ambiente tiene mucho que ver con el consumo; así, de García et al. (2017), afirmaban que el consumo de productos farmacéuticos, como antiinflamatorios, antidepresivos y ácido salicílico, iba en aumento año tras año. Este consumo está ligado con el estilo de vida, o con enfermedades propias de la sociedad actual. Para Matamoros et al. (2015), la cafeína, el acetaminofén y el ibuprofeno son los contaminantes emergentes que mayores concentraciones alcanzan (alrededor de $9 \mu\text{g L}^{-1}$). Los compuestos estilo de vida como la cafeína (Arias y Escudero, 2011), nicotina (Montesdeoca-Esponda et al., 2015), así como las drogas ilícitas (Jurado et al., 2016) han incrementado su concentración y distribución en países desarrollados (Díaz-Garduño et al., 2017). Por ello, la cafeína se ha usado como un bio-indicador de contaminación antropogénica (Filippe et al., 2016; Manamsa et al., 2016a). Dvory et al. (2018), usaron, además, carbamazepina para evaluar la contaminación de aguas subterráneas. Entre los diversos estudios de diagnóstico de la distribución y concentraciones de CE en grandes regiones, cabe destacar a Nega et al. (2019), con tres puntos de muestreo a lo largo del río Panke en Berlín (Alemania), encontrando 29 microcontaminantes, con la gabapentina, el diclofenaco, valsartan y ácido clofíbrico como los más abundantes; también observaron y cuantificaron las afectaciones sobre la comunidad bacteriana de los sedimentos, como una muestra de los efectos tóxicos de estos contaminantes; y Manamsa et al. (2016a) en aguas subterráneas de Inglaterra y Gales, en el que sobresalen las altas concentraciones de hidrocarburos poliaromáticos

(HPA), cafeína, cloroformo y bisfenilo A, entre otros.

Efectos

Algunos autores (Matamoros et al., 2015 y 2016) han hecho análisis de toxicidad con varios CE. Otros como Zhou et al. (2013) y Lesmes et al. (2016) con uno o dos específicos, como nonil y octil fenol, en el primer caso, y las intoxicaciones presentadas por plaguicidas en el departamento del Meta, Colombia, en el segundo. Díaz-Garduño et al. (2017) han evaluado los efectos de algunos CE como HPA, bifenilos policlorados, pesticidas y metales pesados, con base en el riesgo ambiental definido según la Comisión Europea (European Communities, 2003), como el cociente de la concentración ambiental medida sobre la concentración predicha sin efecto. García et al. (2016) evaluaron los efectos de los surfactantes gemini, de mucha aplicabilidad en detergentes, cosméticos, productos de cuidado personal, etc., por medio de la determinación del IC50, concentración tóxica estimada para inmovilizar el 50% de la especie *Daphnia magna*, encontrando que dichas sustancias se catalogan como “Muy tóxicas para el medio acuático” según la OECD (2002). En nuestro país, se realizó en el 2010 un estudio sobre la contaminación de aguas por plaguicidas (Tobón-Marulanda et al., 2010), además de conocer sus efectos, indican que las concentraciones de dichos contaminantes superaban los máximos permitidos por la Resolución 2115/MPS y MAVDT (2007) que regula la calidad del agua de aquel entonces. La Tabla 2 reúne algunos de los efectos más comunes, así como también los rangos de concentraciones típicas reportados, para los contaminantes emergentes más representativos, según la literatura estudiada.

Tabla 2. Efectos de los compuestos representativos de contaminantes emergentes

| Contaminante | Concentraciones | Efectos | Referencias |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| Ibuprofeno (Analgésico) | Entre 0,16 y 9,9 mg L ⁻¹ | <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta crecimiento somático • Disminuye reproducción en <i>Daphnia magna</i> • Disruptor endocrino | Muñoz et al. (2010); Ebele et al. (2017) |
| Diclofenaco (Antiinflamatorio) | Entre 0,08 y 18,74 mg L ⁻¹ | <ul style="list-style-type: none"> • Alteraciones histopatológicas en hígado y branquias en trucha arco iris y carpa común | Muñoz et al. (2010) |

Continúa

Continuación Tabla 2. Efectos de los compuestos representativos de contaminantes emergentes

| Contaminante | Concentraciones | Efectos | Referencias |
|--|---|---|--|
| Acetaminofén (Analgésico) | Entre 0,06 y 2,42 mg L ⁻¹ | • Algunas observaciones lo vinculan con proliferación de células cancerígenas | Fent et al. (2006) |
| Fluoxetina (antidepresivo) | Máximo 27 ng L ⁻¹ Chile: Henríquez-Villa (2012) | • Afectaciones al sistema nervioso, reproductor, metabolismo y locomoción | Henríquez-Villa (2012); Ebele et al. (2017) |
| Carbamazepina (Antiepiléptico) | Entre 0,7 y 1,5 mg L ⁻¹ | • Carcinogénico en ratas y mutagénico en mamíferos | Fent et al. (2006) |
| Triclosán (Antiséptico) | Entre 20 a 86 ng L ⁻¹ para Dhillon et al. (2015) y hasta 200 mg L ⁻¹ según Torres y Echeverría (2017) | • Interrupción del sistema tiroideo • Androgénico y antiestrogénico. • Posible resistencia microbial | Dhillon et al. (2015); Torres y Echeverría (2017); Reyes-Contreras et al., 2019 |
| Bisfenol A (Aditivo industrial) | Según Escalona et al. (2014) entre 0,1 mg L ⁻¹ hasta cientos de mg L ⁻¹ dependiendo de fuente de origen | • Desorden hormonal | Escalona et al. (2014); Rochester y Bolden (2015); Pelch et al. (2019) |
| Estrógenos (Terapia hormonal, anticonceptivo oral) | Según Ramírez-Sánchez et al. (2015) citando otros autores, desde 1,68 hasta 80 ng L ⁻¹ en ríos | • Desorden hormonal • Cáncer • Diabetes | Hu et al. (2011); Arnold et al. (2013); Dimogerontas y Liapi (2014); Ramírez-Sánchez et al. (2015) |
| Bloqueadores beta: Gemfibrozilo Metropol y ácido clofibrico | 50 g d ⁻¹ carga a PTAR en Alemania. Concentraciones de 0,3 a 0,79 mg L ⁻¹ | • Desorden hormonal en peces • Bioacumulación • Perjudiciales para peces | Henríquez-Villa (2012) |
| Antibióticos | Entre 1 a 1900 ng L ⁻¹ en aguas superficiales | • Generan resistencia simple, cruzada y múltiple de bacterias | Kümmerer (2009); Boxall et al. (2012); Lin et al. (2017) |
| Retardantes de llama bromados*: Tetrabromobisfenol A, Hexabromociclododecano y Difenil-éteres polibrominados | No hay información disponible en las fuentes consultadas salvo de parafinas clorinadas, según Kenne y Ahlborg (1996): 0,03 a 1 mg L ⁻¹ | • Disruptor hormonal, cáncer • Daños en sistema nervioso y posiblemente cáncer | Patiño et al. (2014); Gil et al. (2012); Kenne y Ahlborg (1996) |
| Hidrocarburos aromáticos: Benceno | 10 mg L ⁻¹ en aguas de producción, según Benko y Drewes (2008) | • Discromatopsia (incapacidad para distinguir colores) | Habib et al. (2008); Benko y Drewes, 2008 |
| Hidrocarburos fenólicos: Clorofenol Pentaclorofenol (PCP), octilfenol, nonilfenol | 0,221 a 4013 mg L ⁻¹ , según Patel (2015) | • Alteraciones histopatológicas, mutagenicidad, carcinógeno • Carcinogénico y teratogénico • Disrupción hormonal, específicamente sobre estradiol | Patel, (2015); Flynn (1999); Habib et al. (2008) |
| Metilterbutil éter (aditivo de la gasolina) | Hasta 220 mg L ⁻¹ en aguas de producción. (Girardi, 2014) | • Inhibición de crecimiento celular | Habib et al. (2008); Girardi (2014) |
| Surfactantes | Hasta 15 mg L ⁻¹ según García et al. (2016) | • Disruptor hormonal | Gil et al. (2012); García et al. (2016) |
| Pesticidas Organoclorados: DDT, Aldrin | Hasta 86 ng L ⁻¹ en aguas superficiales | • Intoxicaciones con ingestión | Buchanan et al. (2009); Patiño et al. (2014); Lesmes et al. (2016) |

Continúa

* Aditivos usados en diversos productos industriales para disminuir inflamabilidad

Continuación Tabla 2. Efectos de los compuestos representativos de contaminantes emergentes

| Contaminante | Concentraciones | Efectos | Referencias |
|--|---|---|---|
| Pesticidas organofosforados: Dimetoato y atrazina | De 2 a 40 mg L ⁻¹ según Ahmad et al. (2008), en algunas aguas superficiales | <ul style="list-style-type: none"> • Carcinogénicos, mutagénicos, genotóxicos, efectos sistema reproductor, daños a sistemas nervioso, endocrino, inmune y reproductivo humano | Ahmad et al. (2008); Kabra et al. (2014) |
| Compuestos perfluorados, usados como retardantes de llama, recubrimientos, etc | Entre 42 y 514 ng L ⁻¹ en sedimentos de ríos españoles (Barceló y López, 2008) | <ul style="list-style-type: none"> • Disruptor hormonal, ecotoxicidad crónica • Carcinogénicos (Perfluorooctanosulfonato) | Barceló y López, 2008; Norvill et al. (2016); Miège et al. (2012) |
| Quinolonas Clorhidrato de norfloxacin Levofloxacin | 5 a 8,8 ng L ⁻¹ de levofloxacin en aguas residual hospitalaria | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia antimicrobiana | Bandini y Spisso, 2017; Santos et al. (2017); Xiong et al., 2017a |

Fuente: elaboración propia

Tratamientos biológicos con microalgas

Debido a los efectos de los CE expuestos en la Tabla 2, se justifica la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas tradicionales de remoción en aguas. Por ello, según Ghasemi et al. (2011), el interés de usar microalgas para tratamiento de compuestos orgánicos ha crecido en el presente siglo, incluyendo aplicaciones que van desde la fijación de nitrógeno hasta la producción de biocidas. Esto se debe principalmente a la presión por mejorar la eficiencia de remoción de compuestos como el acetaminofén, en efluentes de plantas de tratamientos hospitalario (Arias y Escudero, 2011), los tiempos de biodegradación de técnicas biológicas son altos, además de los cuidados que exigen. Priac et al. (2017) resumen los principales tratamientos, con ventajas y desventajas, empleados para eliminar alquilfenoles (nonilfenol es el más representativo y alquilfenoles polietoxilados).

Como lo afirma Tolboom et al. (2019), los tratamientos biológicos con microalgas se pueden realizar en lagunas abiertas y en biorreactores de columna de burbujeo. Estos autores indican las eficiencias de remoción de compuestos farmacéuticos como carbamezapina, trimetropin, ácido salicílico, triclosán, entre otros, por medio de *Chlorella vulgaris*, *C. sorokiniana*, *Nannochloris*, *Tetraselmis* y mezclas de microalgas. Los porcentajes de remoción más altos fueron alcanzados por *C. sorokiniana* para ácido salicílico (mayor a 93%) en medio Mann y Miers, con agua sintética; y por *Nannochloris sp.* para ciprofloxacina (100%) en medio F/2. Matamoros et al. (2015)

estudiaron primero a escala piloto el efecto del tiempo de retención hidráulico y la estacionalidad, sobre la eficiencia de remoción de 26 CE, por medio de un consorcio microalgal, en estanques algales de alta velocidad. Ese mismo año, Patel (2015), presentó su disertación doctoral sobre remoción de clorofenoles por medio de bacterias, en un reactor de biopelícula de lecho empacado (PBBR) y en uno de transporte aéreo (ALR), evaluando el tiempo de retención hidráulico, la carga contaminante, la concentración inicial del sustrato, sobre el porcentaje de remoción. Además de Tolboom et al. (2019), los resultados obtenidos por otros autores se presentan en la Tabla 3. Son buenos resultados en general, a excepción de la levofloxacin que es altamente tóxica para las microalgas, pero se debe conocer más a profundidad el mecanismo de acción de las microalgas, según sea en lagunas abiertas o en fotobiorreactores cerrados, que a su vez varían según su configuración, con el fin de estandarizar y optimizar los tratamientos, y de mejorar en algunos casos las eficiencias.

Mecanismos de degradación

Los trabajos pioneros de Semple et al. (1999) dieron paso a la revisión de trabajos con microalgas para remover los contaminantes emergentes más conocidos a la fecha: compuestos aromáticos: anilina, fenoles y cresol; y algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos como naftaleno y fenantreno. Recalcan que un consorcio de microalgas puede efectuar mejor el proceso de biodegradación, que se da, por reacciones de desulfonación, deshalogenación

Tabla 3. Porcentajes de remoción representativos por tratamientos biológicos

| CE | Especie | Porcentaje de remoción y condiciones | Referencia |
|------------------|--|---|--------------------------|
| Acetaminofén | <i>Chlorella vulgaris</i> * | 99% lagunas algales | Matamoros et al. (2015) |
| Ácido salicílico | <i>Chlorella sorokiniana</i> | 98% fotobiorreactores | Escapa et al. (2017) |
| Atrazina | <i>Chlamydomonas mexicana</i> | 41% Fotobiorreactores tipo Erlenmeyer | Kabra et al. (2014) |
| Cafeína | <i>Chlorella vulgaris</i> ** | 99% lagunas algales | Matamoros et al. (2015) |
| Carbamezapina | <i>Chlamydomonas mexicana</i> | 35% fotobiorreactores tipo Erlenmeyer | Xiong et al. (2016) |
| | <i>Scenedesmus obliquus</i> | 28% fotobiorreactores tipo Erlenmeyer | Xiong et al. (2016) |
| 4-clorofenol | Ocho cepas bacterianas | 99,8% reactor tipo ARL | Patel (2015) |
| p-clorofenol | <i>C. vulgaris</i> y <i>Coenochloris pyrenoidosa</i> | 9 d para 100% para 25 y 50 mg L ⁻¹ de CE; y 10 d con 100 mg L ⁻¹ | Lima et al. (2004) |
| Cromo | <i>Pseudomonas putida</i> (bacteria) | 61% fotobiorreactores tipo Erlenmeyer | Garg et al. (2018) |
| | <i>Aspergillus niger</i> (hongo) y tres cepas de bacterias | 90% Reactor secuencial: bacterias y luego hongos | Srivastava et al. (2007) |
| Diclofenaco | <i>Chlorella sorokiniana</i> | Hasta 60% fotobiorreactores | Butkovskiy (2015) |
| Ibuprofeno | <i>Chlorella sorokiniana</i> | 100% fotobiorreactores con medio derivado de reactores UASB | Butkovskiy (2015) |
| Levofloxacina | <i>Chlorella vulgaris</i> | 12% Fotobiorreactores tipo Erlenmeyer. Microalga adaptada a medio concentrado (hasta 350 mg L ⁻¹) | Xiong et al. (2017b) |
| Metoprolol | <i>Chlorella sorokiniana</i> | 100% fotobiorreactores con medio formado con orina sintética | Butkovskiy (2015) |
| Nonilfenol | <i>Scenedesmus obliquus</i> | 100% fotobiorreactores tipo Erlenmeyer, a partir de 0,25 mg L ⁻¹ | Zhou et al. (2013) |
| Octilfenol | <i>Scenedesmus obliquus</i> | 100% fotobiorreactores tipo Erlenmeyer, a partir de 2 mg L ⁻¹ | Zhou et al. (2013) |
| Paracetamol | <i>Chlorella sorokiniana</i> | 100% fotobiorreactores con medio derivado de reactores UASB | Butkovskiy (2015) |
| Pentaclorofenol | <i>Aspergillus niger</i> (hongo) y tres cepas de bacterias | 67% reactor secuencial: bacterias y luego hongos | Srivastava et al. (2007) |

* Consorcio microalgal dominado por esta especie. ** Consorcio microalgal dominado por esta especie

Fuente: elaboración propia.

y desnitrificación, principalmente. Más adelante, Lima et al. (2004) estudiaron la degradación de clorofenol por medio de un consorcio de *Chlorella vulgaris* y *Coenochloris pyrenoidosa* encontrando que la biodegradación era el mecanismo más relevante, como se desprende del hecho de que la adición de una zeolita no incrementó la eficiencia. Aunque no fue con microalgas, el trabajo de Srivastava et al. (2007), plantea que las paredes celulares, de bacterias en ese caso, son puntos de adsorción para la degradación de contaminantes. Zhou et al. (2013) plantearon que la información disponible sobre los procesos de degradación y bio acumulación de contaminantes emergentes como los alquiflenoles por parte de microalgas, era insuficiente. Años después, Matamoros et al. (2015 y 2016), estudiaron los mecanismos

predominantes como volatilización o despojo por aire, seguido de biodegradación y fotodegradación, siendo ésta última importante solo en el estudio realizado a escala piloto en grandes estanques algales de alta tasa (HRAP). Evaluaron la capacidad de un consorcio de algas, dominado por *Chlorella vulgaris*, para remover una gran cantidad de contaminantes, alcanzando porcentajes de 99% para acetaminofén y 22% para 2,4 D. A nivel particular, Xiong et al. (2016), analizaron la biodegradación de carbamezapina usando *Chlamydomonas mexicana* y *Scenedesmus obliquus*, determinando las concentraciones de los metabolitos secundarios. La *C. mexicana* presentó mejor tolerancia. Los mecanismos principales fueron bioacumulación y biodegradación, hallando dos metabolitos no cancerígenos.

La revisión realizada por Norvill et al. (2016), indica que aunque la biodegradación no es el mecanismo de mayor incidencia, no se puede descartar; sin embargo, hacen énfasis en fotodegradación y sorción (o bioadsorción), para estanques algales. Con respecto a la adsorción, pero no en las microalgas sino en la matriz rocosa, este mecanismo de degradación natural lo sufren los CE cuando se infiltran hasta alcanzar depósitos y acuíferos subterráneos, pero muchas veces genera mayor diversidad de micro contaminantes allí, que en la superficie misma (Manamsa et al., 2016b). Para Xiong et al. (2017c), los mecanismos son tres: bioadsorción, bioacumulación y biodegradación intra y extracelular. No obstante, para Tolboom et al. (2019) los mecanismos son biodegradación, fotodegradación, volatilización y sorción en el alga, está última igual que Grill et al. (2016). Xiong et al. (2017a), en su estudio con *Chlorella vulgaris* aclimatada y con concentraciones variables de cloruro de sodio, para degradar el antibiótico levofloxacin, encontraron

que la fotodegradación no fue significativa, pero si la bioacumulación determinada mediante balance de masa del contaminante en el proceso. Los mismos autores, pero en posterior trabajo (Xiong et al., 2017b), analizaron un consorcio de cinco especies de microalgas para la remoción del antibiótico enrofloxacin; encontraron que el consorcio fue más sensible a altas concentraciones, disminuyendo la velocidad de crecimiento celular, pero su capacidad de remoción fue comparable con el mejor valor individual. Otros estudios alrededor del tema de los consorcios, o comunidades microalgales que exploran el mecanismo de bioaumentación, son los de Lima et al. (2004) y Matamoros et al. (2016). Así mismo, Wang et al. (2016) ven el uso de estos consorcios como una gran oportunidad para sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya no solamente con microalgas, sino utilizando también bacterias. En la Tabla 4 se resumen estos mecanismos con algunas referencias y las especies analizadas en cada una de ellas.

Tabla 4. Mecanismos de degradación de contaminantes emergentes por microalgas.

| Mecanismo | Definición | Referencias/Especies |
|----------------|---|--|
| Biodegradación | Reacciones de descomposición que reducen la toxicidad del compuesto original. Algunas reacciones son hidrólisis y oxidación. Puede darse al interior, por acción enzimática; o al exterior de las células, por acción e compuestos excretados (EPS: sustancias poliméricas extracelulares) | Kabra et al. (2014) (<i>Chlamydomonas mexicana</i>) Xiong et al. (2016) (<i>Chlamydomonas mexicana</i>) Xiong et al. (2017c) (<i>Scenedesmus obliquus</i> y <i>Chlorella pyrenoidosa</i>) |
| Bioacumulación | Acumulación del contaminante en los tejidos. Se observa mediante cambios en la estructura celular. La cinética de crecimiento celular es similar a la de degradación del contaminante, hasta límite de tolerancia de la especie. Cuando la bioacumulación disminuye, empieza a ser importante la biodegradación | Dwivedi et al. 2010 (<i>Oscillatoria tenuis</i> y <i>Chlamydomonas angulosa</i>) Subashchandrabose et al. (2013) Cianobacterias y microalgas Zhou et al. (2013) (<i>Scenedesmus obliquus</i>) Kabra et al. (2014) (<i>Chlamydomonas mexicana</i>) Mezzelani et al. (2016) (Bivalvos) Xiong et al. (2017c) (<i>Desmodesmus subspicatus</i>) Reyes-Contreras et al. (2019) (Biosólidos: lodos anaeróbicos) |
| Adsorción | Fijación por fuerzas electrostáticas a superficie celular. A menor $\log K_{ow}$ * más dificultad para este proceso | Xiong et al. (2017c) <i>Scenedesmus obliquus</i> y <i>Chlorella pyrenoidosa</i> |
| Bioaumentación | El consorcio entre dos, o más, especies de microalgas, o incluso con otros microorganismos, produce una sinergia en la degradación y amplía el espectro de contaminantes a tratar, así como la tolerancia a mayores concentraciones iniciales | Lima et al. (2004) <i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Coenochloris pyrenoidosa</i> Xiong et al. (2017b) <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Scenedesmus obliquus</i> , <i>Chlamydomonas mexicana</i> , <i>Ourococcus multispurus</i> y <i>Micractinium resslerii</i> |

* Logaritmo de distribución o repartición agua / aceite. A menor valor, más hidrofobicidad.

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El uso de las microalgas para remover compuestos orgánicos emergentes, aunque se ha documentado por Gotaas y Oswald (1955), hasta hace poco se ha intensificado, con métodos que van desde las lagunas, hasta reactores tubulares de burbujeo. Sus múltiples ventajas van desde la facilidad de instalación del sistema (en sistemas abiertos) y bajos costos comparados con tecnologías como los procesos de oxidación avanzada con excepción de la fotocatalisis solar, hasta la posibilidad de generar ciertos ingresos por medio del empleo de la biomasa microalgal residual para producir biocombustibles o productos nutraceuticos. No obstante, hace falta investigación sobre los factores a controlar para mejorar la eficiencia del proceso de remoción de mezclas de contaminantes, presentes en las aguas residuales. Por otra parte, como se ha mencionado a lo largo de este trabajo dos de las especies más usadas para tratamiento de aguas residuales con presencia de contaminantes emergentes, son *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus sp.* cuyos principales mecanismos de remoción de contaminantes: bioadsorción y biodegradación, se ven afectados por el tipo de proceso: lagunas abiertas o fotobiorreactores, o el empleo de una sola especie o de un consorcio. Para terminar, se debe recalcar que en Colombia no se ha elaborado una línea base de presencia, distribución ni fuentes de contaminantes emergentes como si se ha hecho en varios países desarrollados y en vías de desarrollo; tampoco se han implementado a nivel masivo, tratamientos basados en microalgas para remover estos compuestos, ni en aguas superficiales ni en aguas residuales industriales, residenciales u hospitalarias. Apenas hay unas caracterizaciones locales y revisiones limitadas a efectos.

Bibliografía

Ahmad, A., Tan, L., Shukor, S., 2008. Dimethoate and atrazine retention from aqueous solution by nanofiltration membranes. *J. Hazard. Mater.* 151(1), 71-77. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.047

Arias, C., Escudero, A., 2011. Estudio preliminar de la presencia de compuestos emergentes en las aguas residuales del Hospital Universidad del Norte. En: Ojeda, S., Cruz, S., Taboada, P., Aguilar, Q. (Coord.), *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente*

de energía y materia prima. Universidad Autónoma de Baja California, México. pp. 275-280.

- Arnold, K., Boxall, A., Brown, A., Cuthbert, R., Gaw, S., Hutchinson, T., Jobling, S., Madden, J., Metcalfe, C., Naidoo, V., Shore, R., Smits, J., Taggart, M., Shore, R., 2013. Assessing the exposure risk and impacts of pharmaceuticals in the environment on individuals and ecosystems. *Biol. Lett.* 9, 20130492. DOI: 10.1098/rsbl.2013.0492
- Banjac, Z., Ginebreda, A., Kuzmanovic, M., Marcé, R., Nadal, M., Riera, J., Barceló, D., 2015. Emission factor estimation of ca. 160 emerging organic microcontaminants by inverse modeling in a Mediterranean river basin (Llobregat, NE Spain). *Sci. Total Environ.* 520, 241-252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.055
- Bandini, T., Spisso, B., 2017. Risco sanitário do mel no Brasil em relação a novas ameaças: resíduos e contaminantes químicos emergentes. *Vigil. Sanit. Debate* 5(1), 116-126. DOI: 10.22239/2317-269x.00789
- Barboza, L., 2015. Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias. *Gest. Ambient.* 18(1), 81-93.
- Barceló, D., López, M., 2008. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. En: *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel Científico-Técnico de Seguimiento de la Política de Aguas*, Sevilla, España.
- Benko, K., Drewes, J., 2008. Produced water in the Western United States: geographical distribution, occurrence, and composition. *Environ. Eng. Sci.* 25(2), 239-246. DOI: 10.1089/ees.2007.0026
- Boxall, A., Rudd, M., Brooks, B., Caldwell, D., Choi, K., Hickmann, S., ... Ankley, G., 2012. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions? *Environ. Health Perspect.* 120(9), 1221-1229. DOI: 10.1289/ehp.1104477
- Bravo, J., 2009. Contaminantes emergentes en el agua. *Rev. Digit. Univ.* 10(8), 1-7.
- Buchanan, I., Liang, H., Khan, W., Liu, Z., Singh, R., Ikehata, K., Chelme-Ayala, P., 2009. Pesticides and herbicides. *Water Environ. Res.* 81(10), 1731-1816. DOI: 10.2175/106143009X12445568400331
- Butkovskyi, A., 2015. Removal of micropollutants in source separated sanitation. Wageningen University, Wageningen, Holanda.
- Camacho-Muñoz, D., Martín, J., Santos, J., Alonso, E., Aparicio, I., De la Torre, T., Rodríguez, C., Malfeito, J., 2012. Effectiveness of three configurations of membrane bioreactors on the removal of priority and emergent organic compounds from wastewater: comparison with conventional wastewater treatments. *J. Environ. Monit.* 14(5), 1428-1436. DOI: 10.1039/c2em00007e

- Cartagena, C., 2011. Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Rev. Lallista Investig.* 8(2), 143-153.
- de García, S., García-Encina, P., Irusta-Mata, R., 2017. The potential ecotoxicological impact of pharmaceutical and personal care products on humans and freshwater, based on USEtox™ characterization factors. A Spanish case study of toxicity impact scores. *Sci. Total Environ.* 609, 429-445. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.148
- Dhillon, G., Kaur, S., Pulicharla, R., Brar, S., Cledón, M., Verma, M., Surampalli, R., 2015. Triclosan: current status, occurrence, environmental risks and bioaccumulation potential. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12(5), 5657-5684. DOI: 10.3390/ijerph120505657
- Díaz-Garduño, B., Pintado-Herrera, M., Biel-Maeso, M., Rueda-Márquez, J., Lara-Martín, P., Perales, J., Manzano, M., Garrido-Pérez, C., Martín-Díaz, M., 2017. Environmental risk assessment of effluents as a whole emerging contaminant: Efficiency of alternative tertiary treatments for wastewater depuration. *Water Res.* 119, 136-149. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.021
- Dimogerontas, G., Liapi, C., 2014. Endocrine disruptors (Xenoestrogens): an overview. En: Eliades, T., Eliades, G. (eds), *Plastics in dentistry and estrogenicity*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 3-48. DOI: 10.1007/978-3-642-29687-1_1
- Dvory, N., Livshitz, Y., Kuznetsov, M., Adar, E., Gasser, G., Pankratov, I., Lev, O., Yakirevich, A., 2018. Caffeine vs. carbamazepine as indicators of wastewater pollution in a karst aquifer. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22(12), 6371-6381. DOI: 10.5194/hess-22-6371-2018
- Dwivedi, S., Srivastava, S., Mishra, S., Kumar, A., Tripathi, R., Rai, U., Dave, R., Tripathi, P., Charkrabarty, D., Trivedi, P., 2010. Characterization of native microalgal strains for their chromium bioaccumulation potential: Phytoplankton response in polluted habitats. *J. Hazard. Mater.* 173(1-3), 95-101. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.053
- Ebele, A., Abdallah, M., Harrad, S., 2017. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerg. Contam.* 3(1), 1-16. DOI: 10.1016/j.emcon.2016.12.004
- Escalona, I., Fortuny, A., Stueber, F., Bengoa, C., Fabregat, A., Font, J., 2014. Fenton coupled with nanofiltration for elimination of bisphenol A. *Desalination* 345, 77-84. DOI: 10.1016/j.desal.2014.04.024
- Escapa, C., Coimbra, R., Paniagua, S., García, A., Otero, M., 2016. Comparative assessment of diclofenac removal from water by different microalgae strains. *Algal Res.* 18, 127-134. DOI: 10.1016/j.algal.2016.06.008
- Escapa, C., Coimbra, R., Paniagua, S., García, A., Otero, M., 2017. Paracetamol and salicylic acid removal from contaminated water by microalgae. *J. Environ. Manage.* 203, 799-806. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.06.051
- European Communities, 2003. *Technical Guidance Document on Risk Assessment*. Ispra (IT): European Commission Joint Research Centre. EUR, 20418. Luxemburgo.
- Fent, K., Weston, A., Caminada, D., 2006. Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquat. Toxicol.* 76(2), 122-159. DOI: 10.1016/j.aquatox.2005.09.009
- Filippe, T., de Almeida Brehm, F., Mizukawa, A., de Azevedo, J., 2016. Contaminantes emergentes no rio Barigui-Curitiba (PR). En: 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental: Regulação ambiental, desenvolvimento e inovação. Porto Alegre, Brasil.
- Flynn, M., 1999. *Biodegradation of pentachlorophenol*. Tesis de maestría. Universidad de Massey, Palmerston North, Nueva Zelanda.
- García, M., Kaczerewska, O., Ribosa, I., Brycki, B., Materna, P., Drgas, M., 2016. Biodegradability and aquatic toxicity of quaternary ammonium-based gemini surfactants: Effect of the spacer on their ecological properties. *Chemosphere* 154, 155-160. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.109
- Garg, S., Garg, S., Tripathi, M., Singh, K., 2018. Microbial treatment of tannery effluent by augmenting psychrotrophic *Pseudomonas putida* isolate. *Environ. Pollut. Prot.* 3(1), 23-39. DOI: 10.22606/ep.2018.31003
- Ghasemi, Y., Rasoul-Amini, S., Fotooh-Abadi, E., 2011. The biotransformation, biodegradation, and bioremediation of organic compounds by microalgae 1. *J. Phycol.* 47(5), 969-980. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2011.01051.x
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., Gutiérrez, O., 2012. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Rev. P+L* 7(2), 52-73.
- Girardi, A., 2014. *Wastewater treatment and reuse in the oil & petrochem industry—a case study*. En: Santoro, D. (Ed.), *Wastewater and Biosolids Treatment and Reuse: Bridging Modeling and Experimental Studies*. Trojan Technologies and Western University; ECI Symposium Series, Otranto, Italia.
- Gotaas, H., Oswald, W., 1955. Photosynthesis in sewage treatment. *J. Sanit. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 81, 686-693.
- Grill, G., Khan, U., Lehner, B., Nicell, J., Ariwi, J., 2016. Risk assessment of down-the-drain chemicals at large spatial scales: Model development and application to contaminants originating from urban areas in the Saint Lawrence River Basin. *Sci. Total Environ.* 541, 825-838. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.100
- Habib, A., Molla, S., Chelme-Ayala, P., El-Din, A., Baawain, M., El-Din, M., 2008. Petrochemicals. *Water Environ. Res.* 80(10), 1510-1537. DOI: 10.2175/106143008X328725
- Henríquez-Villa, D. 2012. *Presencia de contaminantes emergentes en aguas y su impacto en el ecosistema. Estudio de caso: productos farmacéuticos en la cuenca del río Biobío, Región del Biobío, Chile*. Tesis de

- doctorado. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
- Hernández-Quiroz, M., Ruiz-Meza, D., Rojo-Callejas, F., de León-Hill, C., 2019. Determinación de la distribución de contaminantes emergentes en agua intersticial en sedimentos de humedal mediante la optimización y validación de un método analítico. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 35(2), 407-419. DOI: 10.20937/RICA.2019.35.02.12
- Hu, C., Hermann, G., Pen-Mouratov, S., Shore, L., Steinberger, Y., 2011. Mammalian steroid hormones can reduce abundance and affect the sex ratio in a soil nematode community. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142(3-4), 275-279. DOI: 10.1016/j.agee.2011.05.024
- Jurado, A., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Barceló, D., 2016. Contaminantes orgánicos emergentes (COEs) en las aguas subterráneas (AASS) en España. En: Jornadas "Celebración 50 Aniversario CIHS 1966-2016". Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, España.
- Kabra, A., Ji, M., Choi, J., Kim, J., Govindwar, S., Jeon, B., 2014. Toxicity of atrazine and its bioaccumulation and biodegradation in a green microalga, *Chlamydomonas mexicana*. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21(21), 12270-12278. DOI: 10.1007/s11356-014-3157-4
- Keller, V., Lloyd, P., Terry, J., Williams, R., 2015. Impact of climate change and population growth on a risk assessment for endocrine disruption in fish due to steroid estrogens in England and Wales. *Environ. Pollut.* 197, 262-268. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.017
- Kenne, K., Ahlborg, U., 1996. Environmental Health Criteria 181, Chlorinated Paraffins. World Health Organization, Ginebra.
- Kümmerer, K., 2009. Antibiotics in the aquatic environment—A review—Part I. *Chemosphere* 75(4), 417-434. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.11.086
- Lesmes, O., Agudelo, C., Rodríguez, N., 2016. Situación epidemiológica de la intoxicación con plaguicidas en los municipios del Meta, periodo 2009-2014. *Rev. Salud Hist. Sanid.* 11(1), 27-35.
- Lima, S., Raposo, M., Castro, P., Morais, R., 2004. Biodegradation of p-chlorophenol by a microalgae consortium. *Water Res* 38(1), 97-102. DOI: 10.1016/j.watres.2003.09.005
- Lin, H., Ye, C., Chen, S., Zhang, S., Yu, X., 2017. Viable but non-culturable *E. coli* induced by low level chlorination have higher persistence to antibiotics than their culturable counterparts. *Environ. Pollut.* 230, 242-249. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.047
- Manamsa, K., Crane, E., Stuart, M., Talbot, J., Lapworth, D., Hart, A., 2016a. A national-scale assessment of micro-organic contaminants in groundwater of England and Wales. *Sci. Total Environ.* 568, 712-726. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.017
- Manamsa, K., Lapworth, D., Stuart, M., 2016b. Temporal variability of micro-organic contaminants in lowland chalk catchments: New insights into contaminant sources and hydrological processes. *Sci. Total Environ.* 568, 566-577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.146
- Matamoros, V., Gutiérrez, R., Ferrer, I., García, J., Bayona, J., 2015. Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: a pilot-scale study. *J. Hazard. Mater.* 288, 34-42. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.02.002
- Matamoros, V., Uggetti, E., García, J., Bayona, J., 2016. Assessment of the mechanisms involved in the removal of emerging contaminants by microalgae from wastewater: a laboratory scale study. *J. Hazard. Mater.* 301, 197-205. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.050
- Mezzelani, M., Gorbi, S., Da Ros, Z., Fattorini, D., d'Errico, G., Milan, M., Bargelloni, L., Regoli, F., 2016. Ecotoxicological potential of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) in marine organisms: bioavailability, biomarkers and natural occurrence in *Mytilus galloprovincialis*. *Marine Environ. Res.* 121, 31-39. DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.03.005
- Miège, C., Peretti, A., Labadie, P., Budzinski, H., Le Bizec, B., Vorkamp, K., Tronczyński, J., Persat, H., Coquery, M., Babut, M., 2012. Occurrence of priority and emerging organic compounds in fishes from the Rhone River (France). *Anal. Bioanal. Chem.* 404(9), 2721-2735. DOI: 10.1007/s00216-012-6187-0
- Ministerio de la Protección Social (MPS); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2007. Resolución 2115, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. DO 46.679. Bogotá, DC.
- Montesdeoca-Esponda, S., Estévez, E., Cabrera, M., Sosa-Ferrera, Z., Santana-Rodríguez, J., 2015. Determinación de contaminantes emergentes en aguas subterráneas del Noreste de Gran Canaria. En: II Workshop "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas". Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Muñoz, I., López-Doval, J., Ricart, M., Villagrasa, M., Brix, R., Geiszinger, A., Ginebreda, A., Guasch, H., López de Alda, M., Romani, A., Sabater, S., Barceló, D., 2010. Bridging levels of pharmaceuticals in river water with biological community structure in the Llobregat river basin (northeast Spain). *Environ. Toxicol. Chem.* 28(12), 2706-2714. DOI: 10.1897/08-486.1
- Nega, M., Braun, B., Künzel, S., Szwedzyk, U., 2019. Evaluating the impact of wastewater effluent on microbial communities in the Panke, an Urban River. *Water* 11(5), 888. DOI: 10.3390/w11050888
- Norvill, Z., Shilton, A., Guieysse, B., 2016. Emerging contaminant degradation and removal in algal wastewater treatment ponds: Identifying the research gaps. *J. Hazard. Mater.* 313, 291-309. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.03.085
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2002. Harmonised Integrated

- Classification System for Human Health and Environmental Hazards of Chemical Substances and Mixtures. OECD Series on Testing and Assessment 33. ENV/JM/MONO (2001). Paris. DOI: 10.1787/9789264078475-en
- Patel, B., 2015. Microbial degradation of chlorophenols in batch and continuous bioreactors: kinetic study and optimization of process parameters. Tesis de doctorado. National Institute of Technology, Rourkela, India.
- Patiño, Y., Díaz, E., Ordóñez, S., 2014. Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y sistemas de tratamiento. Av. Cienc. Ing. 5(2), 1-20.
- Pelch, K., Wignall, J., Goldstone, A., Ross, P., Blain, R., Shapiro, A., Holmgren, S., Hsieh, J.-H., Svoboda, D., Auerbach, S., Parham, F., Masten, S., Walker, V., Rooney, A., Thayer, F., 2019. A scoping review of the health and toxicological activity of bisphenol A (BPA) structural analogues and functional alternatives. Toxicology 424, 152235. DOI: 10.1016/j.tox.2019.06.006
- Priac, A., Morin-Crini, N., Druart, C., Gavoille, S., Bradu, C., Lagarrigue, C., Torri, G., Winterton, P., Crini, G., 2017. Alkylphenol and alkylphenol polyethoxylates in water and wastewater: A review of options for their elimination. Arab. J. Chem. 10 (Supl.), 3749-3773. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.05.011
- Prócel, D., Posligua, P., Banchón, C., 2016. Biodegradación de contaminantes orgánicos de la industria láctea. Enfoque UTE 7(1), 22-32. DOI: 10.29019/enfoqueute.v7n1.85
- Ramírez-Sánchez, I., Martínez-Austria, P., Quiroz-Alfaro, M., Bandala, E., 2015. Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. Tecnol. Cienc. Agua 6(5), 31-42.
- Reyes-Contreras, C., Leiva, A., Vidal, G., 2019. Evaluation of triclosan toxic effects on the methanogenic activity. Electron. J. Biotechn. 39, 61-66. DOI: 10.1016/j.ejbt.2019.03.006
- Rochester, J., Bolden, A., 2015. Bisphenol S and F: a systematic review and comparison of the hormonal activity of bisphenol A substitutes. Environ. Health Perspect. 123(7), 643-650. DOI: 10.1289/ehp.1408989
- Santos, M., Oehninger, I., Willig, J., Rosa, M., 2017. Utilização de fotocatalise heterogênea para a degradação de contaminantes emergentes: cloridrato de norfloxacin. Rev. Quím. Ind. 758(1), 25-35.
- Semple, K., Cain, R., Schmidt, S., 1999. Biodegradation of aromatic compounds by microalgae. FEMS Microbiol. Lett. 170(2), 291-300. DOI: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13386.x
- Sorensen, J., Lapworth, D., Nkhuwa, D., Stuart, M., Gooddy, D., Bell, R., Chirwa, M., Kabika, J., Liemisa, M., Chibesa, M., Pedley, S., 2015. Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. Water Res. 72, 51-63. DOI: 10.1016/j.watres.2014.08.002
- Srivastava, S., Ahmad, A., Thakur, I., 2007. Removal of chromium and pentachlorophenol from tannery effluents. Bioresour. Technol. 98(5), 1128-1132. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.04.011
- Subashchandrabose, S., Ramakrishnan, B., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R., 2013. Mixotrophic cyanobacteria and microalgae as distinctive biological agents for organic pollutant degradation. Environ. Int. 51, 59-72. DOI: 10.1016/j.envint.2012.10.007
- Tobón-Marulanda, F., López-Giraldo, L., Paniagua-Suárez, R., 2010. Contaminación del agua por plaguicidas en un área de Antioquia. Rev. Salud Pública 12, 300-307. DOI: 10.1590/S0124-00642010000200013
- Tolboom, S., Carrillo-Nieves, D., de Jesús Rostro-Alanis, M., de la Cruz Quiroz, R., Barceló, D., Iqbal, H., Parra-Saldivar, R., 2019. Algal-based removal strategies for hazardous contaminants from the environment—a review. Sci. Total Environ. 665, 358-366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.129
- Torres, C., Echeverría, S., 2017. Determinación preliminar de triclosán por espectroscopia UV-Vis en aguas residuales de la ciudad de Guatemala. Cienc. Tecnol. Salud 4(1), 87-130.
- Wang, Y., Ho, S.-H., Cheng, C.-L., Guo, W.-Q., Nagarajan, D., Ren, N.-Q., Lee, D.-J., Chang, J.-S., 2016. Perspectives on the feasibility of using microalgae for industrial wastewater treatment. Bioresour. Technol. 222, 485-497. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.106
- Xie, M., Nghiem, L., Price, W., Elimelech, M., 2012. Comparison of the removal of hydrophobic trace organic contaminants by forward osmosis and reverse osmosis. Water Res. 46(8), 2683-2692. DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.023
- Xiong, J.-Q., Kurade, M., Abou-Shanab, R., Ji, M.-K., Choi, J., Kim, J., Jeon, B.-H., 2016. Biodegradation of carbamazepine using freshwater microalgae *Chlamydomonas mexicana* and *Scenedesmus obliquus* and the determination of its metabolic fate. Bioresour. Technol. 205, 183-190. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.01.038
- Xiong, J.-Q., Kurade, M., Jeon, B.-H., 2017a. Biodegradation of levofloxacin by an acclimated freshwater microalga, *Chlorella vulgaris*. Chem. Eng. J. 313, 1251-1257. DOI: 10.1016/j.cej.2016.11.017
- Xiong, J.-Q., Kurade, M., Jeon, B.-H., 2017b. Ecotoxicological effects of enrofloxacin and its removal by monoculture of microalgal species and their consortium. Environ. Pollut. 226, 486-493. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.044
- Xiong, J.-Q., Kurade, M., Jeon, B.-H., 2017c. Can microalgae remove pharmaceutical contaminants from water? Trends Biotechnol. 36(1), 30-44. DOI: 10.1016/j.tibtech.2017.09.003
- Zhou, G.-J., Peng, F.-Q., Yang, B., Ying, G.-G., 2013. Cellular responses and bioremoval of nonylphenol and octylphenol in the freshwater green microalga *Scenedesmus obliquus*. Ecotox. Environ. Safe. 87, 10-16. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.10.002