

Capítulo 16

Ficorremediación

Ruth Elena Soria Guerra
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Resumen

El crecimiento demográfico de las últimas décadas ha dado lugar a un aumento de agua contaminada derivada de diversas actividades antropogénicas; esto ha generado preocupación por la cantidad y calidad de los desechos generados y descargados en cuerpos de agua naturales. En las últimas décadas se han empleado a las microalgas como una alternativa para abordar los desafíos de la calidad del agua. Las microalgas como agentes descontaminantes ofrecen varias ventajas que incluyen bajos costos de producción, fácil manipulación, no son contaminantes y posibilitan la extracción de contaminantes metálicos, fármacos y diversas sales, por lo que no son considerados una fuente de desechos secundarios ya que la biomasa resultante puede ser reutilizada en diversos sistemas de producción tales como avicultura, acuicultura, agricultura, etc., y para la generación de nuevas

fuentes de biocombustible y fertilizantes. En este capítulo se describe la importancia de la fitorremediación y el uso de diversas especies de microalgas para la remoción de metales pesados, fármacos y compuestos fenólicos.

Introducción

La fitorremediación consiste en el uso de micro y macroalgas para remover contaminantes, incluyendo xenobióticos, nutrientes de aguas residuales y el CO_2 proveniente de emisiones. La biorremediación con microalgas es particularmente efectiva debido a su capacidad para convertir la energía luminosa en biomasa y asimilar gran cantidad de nutrientes inorgánicos como fósforo y nitrógeno. Se considera un proceso global en el tratamiento de aguas residuales ya que hay remoción de sales, aumento del pH de los efluentes, eliminación de nitrógeno amoniacal, disminución de la demanda biológica de oxígeno, oxigenación del agua y oxidación continua de materia.

La idea de utilizar microalgas en procesos de biodegradación fue propuesta desde los años cincuenta, desde entonces se planteó la idea de que los organismos fotosintéticos podrían ser útiles para la producción de oxígeno, eliminación de CO_2 y además para el tratamiento de aguas residuales. La fitorremediación presenta diversas ventajas como son: el mejoramiento de la calidad del efluente, el aprovechamiento de nutrientes, la producción de biomasa con interés comercial, la oxigenación del agua, la recuperación de CO_2 y un alto rendimiento en la bioconversión de la energía solar.

Adicionalmente, las microalgas poseen una serie de ventajas sobre otras materias primas entre las cuales se pueden mencionar su mayor eficiencia fotosintética respecto a las plantas superiores, logrando convertir entre el 3 y el 8% de la energía solar en biomasa. Otras características de importancia son:

- Su tasa de crecimiento es elevada, algunas microalgas duplican su biomasa en aproximadamente 24 h.
- Los periodos de cosecha son muy cortos (generalmente menores a 20 días dependiendo del proceso), permitiendo múltiples o continuas cosechas a diferencia de las plantas, que se cosechan una o dos veces por año.
- Son de fácil cultivo, pueden crecer en casi cualquier lugar y sólo requieren de luz solar y algunos nutrientes. Pueden cultivarse en zonas no

aptas para cultivos agrícolas por lo que no compiten con los productos de alimentación humana. También pueden utilizar agua no potable y su cultivo no requiere la adición de herbicidas o pesticidas. Incluso algunas microalgas crecen en ambientes salinos e hipersalinos.

- Son capaces de fijar grandes cantidades de CO_2 , su demanda estequiométrica de CO_2 es de aproximadamente 2kg de CO_2 /kg de biomasa seca, permitiendo acoplar su producción a una corriente de gases de combustión industrial y así, contribuir a la disminución de efecto invernadero.

Desde hace varios años se ha reportado la capacidad de las microalgas para remover metales pesados, fármacos y compuestos fenólicos. En este apartado se describen las especies de microalgas mayormente utilizados en procesos de fitorremediación.

Microalgas utilizadas para la remoción de metales pesados

La actividad industrial y minera arroja al ambiente metales tóxicos como plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, entre otros; se consideran elementos contaminantes de la atmósfera por su toxicidad y efectos nocivos sobre los seres vivos. La importancia de sus efectos está en función de la naturaleza del elemento, concentraciones ambientales y el grado de exposición.

Algunos organismos procariontes y eucariontes, entre ellos las microalgas, han desarrollado diversas estrategias para disminuir el efecto tóxico de los metales a formas inocuas. Entre las estrategias que presentan las microalgas se encuentran evitar el paso de los iones a través de la pared celular por medio de secreción de sustancias que producen uniones específicas con los iones metálicos del medio. El resultado de esta estrategia es formar complejos quelados que pueden quedar en el exterior de la pared celular o en compartimientos específicos en el interior de la célula. Un mecanismo común de detoxificación intracelular en microalgas es la formación de péptidos o proteínas, por ejemplo, malato, citrato o polifosfato, los cuales son algunos de los compuestos reportados como agentes quelantes intracelulares.

El proceso de bioabsorción de metales por microalgas es generalmente un proceso de dos fases que implican una adsorción extracelular (por ejemplo, con polisacáridos y mucílago), además de componentes celulares (con grupos car-

boxy e hidroxí y sulfatos). Este proceso no metabólico y rápido que ocurre en células vivas y no vivas depende de parámetros como el pH, especies químicas del metal, tipo de alga y la concentración de biomasa. La segunda fase de absorción es la acumulación dentro de la célula, este es un proceso lento que implica transporte activo a través de la membrana y proteínas de unión en sitios intracelulares. Este proceso es dependiente del metabolismo y es inhibido por bajas temperaturas, ausencia de aporte de energía y sólo ocurre en células vivas.

Desde hace varias décadas se ha demostrado que las microalgas pueden acumular diversos metales entre los que se encuentran: cadmio, zinc, arsénico, plomo, mercurio, uranio, cromo, cobre, molibdeno, aluminio y oro.

La emisión global del cadmio hacia el ambiente proviene en su mayor parte de fuentes antropogénicas, estando asociado a la extracción del zinc y a desechos de las industrias de plásticos, pinturas, aleaciones metálicas y otras operaciones industriales. El cadmio ha sido reconocido como un agente peligroso de contaminación ambiental y es acumulado por el fitoplancton. En la literatura del área se menciona que las especies que acumulan cadmio son: *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella regularis*, *Scenedesmus bijuga*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlamydomonas angulosa*, *Scenedesmus choreloides* y *Dictyosphaerium chlorelloides*.

Las fuentes industriales o los reservorios para residuos tóxicos pueden ser la causa del zinc en el agua potable llegando a niveles que causan problemas de salud pública. Se ha reportado que microalgas tales como *Chaetomorpha brychagona*, *Enteromorpha crinita*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus almeriensis*, *Chlorella pyrenoidosa* y *Scenedesmus obliquus* acumulan altas concentraciones de zinc proveniente de aguas contaminadas.

Chlorella vulgaris acumula altos niveles de arsénico, así como otros metales, lo cual es debido a que tiene mecanismos de detoxificación por medio de los cuales transforma el metal que está acumulando. Estas microalgas podrían ser utilizadas para controlar las concentraciones de arsénico en aguas naturales y en aguas de desecho industrial. Otros géneros de microalgas de agua dulce (*Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus almeriensis* y *Oscillatoria* sp.) y de agua de mar (*Phaeodactylum* sp. y *Skeletonema* sp.) también son capaces de acumular arsénico.

Algunas microalgas como *Eucheuma striatum*, *Euchena spinosum* y *Stigeoclonium tenue*, *Nannochloropsis salina*, *Spirulina platensis* *Pseudochlorococcum typicum* y *Scenedesmus quadricauda* absorben plomo de forma eficiente. En tanto que las microalgas que acumulan cantidades significati-

vas de mercurio son: *Carteria sp.*, *Dunaliella tertiolecta*, *Nitzschia closterium*, *Pseudochlorococcum typicum*, *Scenedesmus quadricauda* y *Chlorella sp.* Se ha reportado que algunas especies de microalgas, entre las que se encuentran *Chlorella regularis*, *Chlamydomonas sp.* y *Scenedesmus sp.* pueden absorber uranio (Sakaguchi, *et al.*, 1978). *Chlamydomonas sp.* aclimatada en altas concentraciones de cromo, muestra una gran habilidad para remover este metal. También, *Chlorella pyrenoidosa*, *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* pueden acumular cromo proveniente de aguas residuales.

Varias especies de microalgas verdes pueden acumular cobre, debido a que presentan tolerancia a este ion metálico tales como *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlamydomonas angulosa*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus bijuga*, *Scenedesmus almeriensis*, *Scenedesmus obliquus* y *Tetraselmis marina*. Especies como *Scenedesmus chlorelloides*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella regularis*, *Scenedesmus bijuga*, *Chlamydomonas angulosa* y *Scenedesmus obliquus*, han resultado ser eficientes para la acumulación de molibdeno. Alrededor de 15 especies pertenecientes a 6 filo (*Chlorophyceae*, *Cryptophyceae*, *Xanthophyceae*, *Bacillariophyceae*, *Chrysophyceae* y *Prasinophyceae*) acumulan aluminio del agua de mar artificial. *Chlorella vulgaris* tiene una alta afinidad con el oro, por lo que esta microalga puede acumular tanto oro (I) como oro (III) de soluciones acuosas.

Debido a que las microalgas presentan adaptaciones y mecanismos de tolerancia, pueden ser bioacumuladores muy eficientes de metales tal como se ha descrito, por lo que pueden ofrecer una alternativa o ayuda a las técnicas convencionales para la eliminación y/o recuperación de metales en lugares contaminados.

Microalgas utilizadas para la remoción de fármacos

Además de remover metales pesados, las microalgas han demostrado capacidad para eliminar compuestos emergentes. Los compuestos emergentes incluyen antibióticos, hormonas, analgésicos, tranquilizantes y los productos de la quimioterapia. La contaminación proviene no sólo de las excreciones, con las que una parte importante del fármaco es eliminado del cuerpo sin metabolizarse, sino que proviene también de la fabricación y disposición inadecuada de los desechos de estos productos.

Desde principios de los años ochenta, diversos estudios han demostrado que los medicamentos y sus productos de transformación están presentes en el medio acuático en todo el mundo. La mayoría de los desechos de la industria farmacéutica son tratados mediante procesos de oxidación química, pero debido a las peligrosas condiciones de la reacción, la generación de compuestos tóxicos secundarios y los altos costos operacionales hacen que esta clase de tratamientos no resulte la mejor opción. Por el contrario, los tratamientos de biodegradación son alternativas amigables con el ambiente y a bajo costo. Algunos microorganismos poseen sistemas enzimáticos especializados y rutas metabólicas que les permiten utilizar los fármacos como fuente de carbono y convertirlos en sustratos fáciles de metabolizar.

Pocos son los estudios que se han enfocado en la remoción de fármacos por microalgas, por ejemplo, se ha reportado la capacidad de remoción de un estrógeno natural (β -estradiol) y un estrógeno sintético (17 α -etinilestradiol) por las cepas de microalgas *Selenastrum capricornutum* y *Chlamydomonas reinhardtii*. Los resultados muestran que la remoción está directamente relacionada con la producción de biomasa. Las dos cepas mencionadas anteriormente fueron capaces de remover ambos estrógenos en los primeros 7 días alcanzando porcentajes finales de remoción de 88-100% por *S. capricornutum* y de entre 76 y 100% por *C. reinhardtii*.

La remoción de paracetamol y ácido salicílico por la microalga *Chlorella sorokiniana* también ha sido reportada, obteniendo eficiencias de remoción mayores a 67% de paracetamol y 73% de ácido salicílico en cultivo batch. En otro estudio se ha evaluado la remoción de diclofenaco por tres especies de microalgas, obteniendo eficiencias de remoción mayores a 65% en el tratamiento con *Chlorella sorokiniana*, de 69% con *Chlorella vulgaris* y de un 98% con *Scenedesmus obliquus* al final del cultivo batch. La biodegradación del ketoprofeno también se ha evaluado utilizando las cepas de microalgas *Chlorella sp*, *Spirulina platensis* y *Artemia sp*. La combinación de un consorcio bacteriano definido y *Chlorella sp* es capaz de degradar ketoprofeno en 7 días bajo un ciclo diurno de 12h de luz / 12h de oscuridad.

La eliminación de micro contaminantes en sistemas de tratamiento de algas alimentado con corrientes de aguas residuales también se ha reportado realizando experimentos en lotes con la microalga *Chlorella sorokiniana* cultivada en orina, agua negra anaerobiamente tratada y orina sintética, en donde se ha evaluado la eliminación de seis fármacos (diclofenaco, ibuprofeno, para-

cetamol, metoprolol, carbamazepina y trimetoprim). Los resultados indicaron que los tratamientos tales como la biodegradación y la fotólisis conducen a una eliminación entre 60 y 100% de diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol y metoprolol, mientras que la extracción de carbamazepina y trimetoprim fue incompleta y no superó el 30% y el 60%, respectivamente. Las microalgas *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata*, *Scenedesmus acutus* y *Scenedesmus obliquus* son capaces de remover diclofenaco entre el 59% y 92%, obteniendo el mayor porcentaje de remoción por *S. obliquus* en 25 días.

Aunque el mecanismo de detoxificación de xenobióticos no ha sido descrito en microalgas en detalle, estudios realizados en plantas indican que ocurren procesos similares en ambos organismos fotosintéticos. Así mismo, los resultados obtenidos a la fecha sugieren una aplicación promisoriosa de las microalgas en procesos de biorremediación para la eliminación de fármacos.

Microalgas utilizadas para la remoción de compuestos fenólicos

La presencia de altas concentraciones de compuestos fenólicos en el medio ambiente es el resultado de la actividad antropogénica. Estos compuestos penetran en los ecosistemas mediante el drenaje de aguas residuales municipales o industriales hacia las aguas superficiales.

El fenol se usa como intermediario en la industria química para la síntesis de compuestos más complejos. La toxicidad de los compuestos fenólicos se debe principalmente a su carácter hidrófobo y a su capacidad para formar radicales libres. Muchos microorganismos, entre ellos las microalgas, se han utilizado para la biodegradación de compuestos fenólicos. Varias especies de algas de agua dulce se han utilizado para la biodegradación de fenol y catecol desde hace varias décadas. Desde entonces, se han publicado una gran cantidad de estudios que demuestran que las microalgas son capaces de biodegradar compuestos fenólicos. Los mecanismos por los cuales se lleva a cabo este proceso son variados, por ejemplo, se ha reportado que la microalga verde *Ochromonas danika* biodegrada el fenol a través de la vía de la meta-escisión (meta-cleavage) a partir del catecol, mientras que en las especies de *Chlorella* hay participación del citocromo P450 en la biodegradación de estos compuestos. Además, se han reportado reacciones dependientes de

NADH durante la biodegradación de compuestos fenólicos por la diatomea marina *Thalassiosira sp.*

Varias publicaciones han demostrado que diversas especies de *Chlorella* son capaces de biodegradar una variedad de compuestos fenólicos, tales como fenol, bisfenol-A, 4-nitrofenol, 4-clorofenol, 2,4-dinitrofenol y 2,4-dimetilfenol. Se ha demostrado también que varias especies de *Scenedesmus* son capaces de eliminar fenoles acilados y bisfenol-A. Las microalgas verdes, *Ankistrodesmus braunii* y *Scenedesmus quadricauda*, también han demostrado capacidad para biodegradar fenoles que se encuentran aguas residuales.

Chlamydomonas mexicana es capaz de eliminar el bisfenol-A, mientras que *Chlamydomonas reinhardtii* ha demostrado ser eficiente para biodegradar fenol. En estas microalgas la biodegradación ha demostrado ser un proceso bioenergético dinámico afectado por cambios en las condiciones de cultivo tales como la presencia o ausencia de una fuente de carbono alterna, intensidad de luz y disponibilidad de oxígeno.

De acuerdo con lo descrito en este capítulo, el uso de microalgas en ficorremediación ha demostrado ser efectivo y eficiente, sin embargo, es necesario la difusión de esta tecnología fuera del ámbito científico y aplicar este conocimiento en instalaciones a gran escala; este paso no es sencillo ya que existen ciertas limitaciones por superar, como aquellas relacionadas con el costo de producción de la biomasa y la posterior separación de esta del medio en que se encuentran. A nuestra consideración, la combinación de ficorremediación de aguas residuales junto con la recuperación de la biomasa para generación de biocombustibles o la obtención de otros productos con valor económico, permitirían reducir los costos, además, el proceso sería ambientalmente atractivo.

Abreviaturas:

CO₂: Dióxido de carbono

h: horas

kg: kilogramo

mM: milimolar

NADH: nicotinamida adenina dinucleótido

sp: especie no identificada

Glosario

- Adsorción:** Proceso por el que el agua o cuerpos disueltos, materiales dispersos o coloides son atraídos y se concentran sobre la superficie de un sólido por enlaces físicos y químicos.
- Antropogénico:** Pertenciente o relativo a lo que procede de los seres humanos que, en particular, tiene efectos sobre la naturaleza.
- Bioacumuladores:** Acumulación neta de metales (u otras sustancias persistentes) en un organismo a partir de fuentes tanto bióticas (otros organismos) como abióticas (suelo, aire y agua).
- Biocombustible:** Combustibles derivados de fuentes renovables.
- Biodegradación:** Descomposición de una sustancia en otras químicamente más sencillas mediante la acción microbiana.
- Biorremediación:** Proceso que utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar un medioambiente alterado por contaminantes a su condición natural.
- Compuestos emergentes:** Todo contaminante previamente desconocido o no reconocido como tal, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de este.
- Consortio bacteriano:** Asociación natural de dos o más poblaciones bacterianas, de diferentes especies, que actúan conjuntamente como una comunidad, donde todos se benefician de las actividades de los demás.
- Citocromo P450:** Familia de enzimas de biotransformación de fase I que juegan un papel importante en el metabolismo y la eliminación de drogas, toxinas, carcinógenos y compuestos endógenos, como las hormonas esteroidales.
- Cultivo batch:** Cultivo discontinuo en el que el microorganismo crece a partir de una limitada cantidad de medio hasta que se agota un nutriente esencial o se acumulan productos tóxicos hasta niveles que inhiben el crecimiento.
- Ecosistema:** Sistema biológico constituido por una comunidad de seres vivos y el medio natural en que viven.
- Ficorremediación:** Empleo de uso de micro y macroalgas para remover contaminantes.

Fila (phylum): La más amplia categoría taxonómica dentro de los Reinos (plural: phyla).

Fotólisis: Descomposición o disociación química por la acción de energía luminosa.

Mucílago: Sustancia análoga a las gomas, con el agua se hincha o da soluciones viscosas con consistencia gelatinosa.

Polisacáridos: Carbohidratos complejos formados por un gran número de azúcares simples, los cuales se unen entre sí mediante los enlaces glucosídicos.

Radicales libres: Moléculas inestables elaboradas durante el metabolismo normal de las células.

Xenobiótico: Sustancia que no se encuentra de forma natural en el organismo.

Bibliografía

- Al-Homaidan, A.A., Al-Abbad, A.F., Al-Hazzani, A.A., Al-Ghanayem, A.A. & Alabdullatif, J.A. (2016). Lead removal by *Spirulina platensis* biomass. *International Journal of Phytoremediation*, 18,184189. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1073673>
- Bartolomé, M.C., Cortés, A.A., Sánchez-Fortún, A., Garnica-Romo, M.G., Sánchez-Carrillo, S. & Sánchez-Fortún S. (2016). Morphological and physiological changes exhibited by a Cd-resistant *Dictyosphaerium chlorelloides* strain and its cadmium removal capacity. *International Journal of Phytoremediation*, 18,1171-1177. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1189400>
- Baselga-Cervera, B., Romero-López, J., García-Balboa, C., Costas, E. & López-Rodas V. (2018). Improvement of the uranium sequestration ability of a *Chlamydomonas* sp. (ChISP Strain) isolated from extreme uranium mine tailings through selection for potential bioremediation application. *Frontiers in Microbiology*, 9, e523. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00523>
- Cameron, H., Mata, M.T. & Riquelme C. (2018). The effect of heavy metals on the viability of *Tetraselmis marina* AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation. *PeerJ*, 6, e5295. <https://doi.org/10.7717/peerj.5295>

- Cho, D.Y., Lee, S.T., Park, S.W. & Chung A.S. (1994). Studies on the biosorption of heavy metals onto *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic/ Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 29(2), 389-409. <https://doi.org/10.1080/10934529409376043>
- De Wilt, A., Butkovski, A., Tuantet, K., Hernández, L., Fernandes, T.V., Langenhoff, A. & Zeeman, G. (2016). Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. *Journal Hazardous Materials*, 304, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.033>
- Ellis, B.E. (1977). Degradation of phenolic compounds by fresh-water algae. *Plant Science Letters*, 8, 213-216. [https://doi.org/10.1016/0304-4211\(77\)90183-3](https://doi.org/10.1016/0304-4211(77)90183-3) [https://doi.org/10.1016/0304-4211\(77\)90183-3](https://doi.org/10.1016/0304-4211(77)90183-3)
- El-Sheekh, M., Farghl, A., Galal, H. & Bayoumi, H. (2015). Bioremediation of different types of polluted water using microalgae. *Rendiconti Lincei*, 27(2), 401-410. <https://doi.org/10.1007/s12210-015-0495-1>
- Escapa, C., Coimbra, R.N., Paniagua, S., García, A.I. & Otero M. (2015). Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*, 185, 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.004>
- Escapa, C., Coimbra, R.N., Paniagua, S., García, A.I. & Otero M. (2016). Comparative assessment of diclofenac removal from water by different microalgae strains. *Algal Research*, 18, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.008>
- Hansch, C., McKarns, S.C., Smith, C.J. & Doolittle, D.J. (2000). Comparative QSAR evidence for a free-radical mechanism of phenol-induced toxicity. *Chemico-Biological Interactions*, 127(1), 61-72. [https://doi.org/10.1016/S0009-2797\(00\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2797(00)00171-X)
- Hirooka, T., Akiyama, Y., Tsuji, N., Nakamura, T., Nagase, H., Hirata, K. & Miyamoto K. (2003). Removal of hazardous phenols by microalgae under photoautotrophic conditions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 95(2), 200-203. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80130-5](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80130-5) [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80130-5](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80130-5)
- Hom, A., Llorca, M., Rodríguez, S., Vicent, T., Barceló, D. & Blánquez, P. (2015). Microalgae cultivation on wastewater digestate: β -estradiol and 17α -ethynylestradiol degradation and transformation products

- identification. *Journal of Environmental Management*, 155,106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.003>
- Ismail, M.M., Essam, T.M., Ragab, Y.M. & Mourad, F.E. (2016). Biodegradation of ketoprofen using a microalgal–bacterial consortium. *Biotechnology Letters*, 38, 1493-1502. <https://doi.org/10.1007/s10529-016-2145-9>
- Jaromir, M., Ozadowicz, R. & Duda, W. (2005). Analysis of chlorophenols, chlorocatechols, chlorinated methoxyphenols and monoterpenes in communal sewage of Lodz and in the Ner river in 1999-2000. *Water & Air Soil Pollution*, 164,205–222. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-3022-7> <https://doi.org/10.1007/s11270-005-3022-7>
- Ji, M.K., Kabra, A.N., Choi, J., Hwang, J.H., Kim, J.R., Abou-Shanab, R.A.I., Oh, Y.K. & Jeon, B.H. (2014). Biodegradation of bisphenol A by the freshwater microalgae *Chlamydomonas mexicana* and *Chlorella vulgaris*. *Ecological Engineering*, 73, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.070>
- Klekner, V. & Kosaric, N. (1992). Degradation of phenolic mixtures by *Chlorella*. *Environmental Technology*, 13, 503–506. <https://doi.org/10.1080/09593339209385177>
- Lima, S.A., Raposo, M.F., Castro, P.M. & Morais, R.M. (2004). Biodegradation of p-chlorophenol by a microalgae consortium. *Water Research*, 38(1), 97–102. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.27-1586>
- Lovell, C.R., Eriksen, N.T., Lewitus, A.J. & Chen, Y.P. (2002). Resistance of the marine diatom *Thalassiosira sp.* to toxicity of phenolic compounds. *Marine Ecology Progress Series*, 229, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.005> <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.005>
- Lunde, G. (1973). The synthesis of fat and water soluble arseno organic compounds in marine and limnetic algae. *Acta Chemica Scandinavica*, 27,1586-1594. <http://acta.chem.scand.org/doi/10.3891/acta.chem.scand.27-1586>
- Mar, C.C., Fan, Y., Li, F.L. & Hu, G.R. (2016). Bioremediation of wastewater from edible oil refinery factory using oleaginous microalga *Desmodesmus sp.* S1. *International Journal of Phytoremediation*, 18, 1195-1201. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1193466>
- Nakajima, A., Horikoshi, T. & Sakaguchi, T. (1981). Studies on the accumulation of heavy metal elements in biological systems. Selective

- accumulation of heavy metal ions by *Chlorella regularis*. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 16, 88-91. [https://doi.org/0171-1741/81/0012/0076/\\$01.60](https://doi.org/0171-1741/81/0012/0076/$01.60) [https://doi.org/0171-1741/81/0012/0076/\\$01.60](https://doi.org/0171-1741/81/0012/0076/$01.60)
- Nakajima, N., Teramoto, T., Kasai, F., Sano, T., Tamaoki, M., Aono, M., Kubo, A., Kamada, H., Azumi, Y. & Saji, H. (2007). Glycosylation of bisphenol A by freshwater microalgae. *Chemosphere*, 69, 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.05.088>
- Nazos, T.T., Kokarakis, E.J. & Ghanotakis, D.F. (2017). Metabolism of xenobiotics by *Chlamydomonas reinhardtii*: Phenol degradation under conditions affecting photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 131, 31-40. <https://doi.org/10.1007/s11120-016-0294-2>
- Papazi, A. & Kotzabasis, K. (2007). Bioenergetic strategy of microalgae for the biodegradation of phenolic compounds - Exogenously supplied energy and carbon sources adjust the level of biodegradation. *Journal Biotechnology*, 129(4), 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.02.021>
- Pinto, G., Pollio, A., Previtera, L. & Temussi, F. (2002). Biodegradation of phenols by microalgae. *Biotechnology Letters*, 24, 2047–2051. <https://doi.org/10.1023/A:1021367304315>
- Quesada Peñate, I., Jáuregui Haza, U.J., Wilhelm, A. & Delmas, H. (2009). Contaminación de las aguas con productos farmacéuticos. Estrategias para enfrentar la problemática. *Ciencias Biológicas*, 40, 173-179. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1812/181221662005>
- Rawat, I., Kumar, R., Mutanda, T. & Bux, F. (2010). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88, 3411-3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Saavedra, R., Muñoz, R., Taboada, M.E., Vega, M. & Bolado, S. (2018). Comparative uptake study of arsenic, boron, copper, manganese and zinc from water by different green microalgae. *Bioresource Technology*, 263, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101> <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101>
- Sakaguchi, T., Nakajima, A. & Horikoshi, T. (1981). Studies on the accumulation of heavy metals elements in biological system. Accumulation of molybdenum by green microalgae. *European Journal of Applied*

- Microbiology and Biotechnology*, 12, 84-89. <https://doi.org/10.1007/BF01970039> <https://doi.org/10.1007/BF01970039>
- Sánchez-Sandoval, D.S., González-Ortega, O., Navarro-Martínez, M.F., Castro-Tapia, J.M., García de la Cruz, R.F., & Soria-Guerra, R.E. (2021). Photodegradation and removal of diclofenac by the green alga *Nannochloropsis oculata*. *Phyton-International Journal of experimental Botany*, 90(5), 1519-1533. doi:10.32604/phyton.2021.015087
- Schmitt, M., Bartels, P., Adler, N. & Altenburger, R. (2007). Phytotoxicity assessment of diclofenac and its phototransformation products. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387, 1389–1396. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0825-3> <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0825-3>
- Semple, K.T. & Cain, R.B. (1996). Biodegradation of phenols by the alga *Ochromonas danica*. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 62, 1265–1273. <https://doi.org/10.1128/AEM.62.4.1265-1273.1996>
- Shanab, S., Essa, A. & Shalaby, E. (2012). Bioremoval capacity of three heavy metals by some microalgae species (Egyptian Isolates). *Plant Signaling & Behavior*, 7, 392-399. <https://doi.org/10.4161/psb.19173>
- Shashirekha, V., Sridharan, M.R. & Swamy, M. (2008). Biosorption of trivalent chromium by free and immobilized blue green algae: kinetics and equilibrium studies. *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 43, 390-401. <https://doi.org/10.1080/10934520701795608>
- Shen, Y., Li, H., Zhu, W., Ho, S.H., Yuan, W., Chen, J. & Xie, Y. (2017). Microalgal-biochar immobilized complex: A novel efficient biosorbent for cadmium removal from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 244, 1031-1038. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.085> <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.085>
- Suresh-Kumar, K., Dahms, H.U., Won, E.J., Lee, J.S. & Shin, K.H. (2015). Microalgae- A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 329-352. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019> <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- Thies, F., Backhaus, T., Bossmann, B. & Grimme, L.H. (1996). Xenobiotic biotransformation in unicellular green algae: Involvement of cytochrome P450 in the activation and selectivity of the pyridazinone pro-herbicide metflurazon. *Plant Physiology*, 112(1), 361–370. <https://doi.org/10.1104/pp.112.1.361>

- Torres, E.M., Hess, D., McNeil, B.T., Guy, T. & Quinn, J.C. (2017). Impact of inorganic contaminants on microalgae productivity and biorremediation potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139, 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.034> <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.034>
- Varsha, Y.M., Naga Deepthi, CH. & Chenna, S. (2011). An emphasis on xenobiotic degradation in environmental clean-up. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 2, S11:001 <https://doi.org/10.4172/2155-6199.S11-001>
- Yoshida, K., Ishii, H., Ishihara, Y., Saito, H. & Okada Y. (2008). Bioremediation potential of formaldehyde by the marine microalga *Nannochloropsis oculata* ST-3 strain. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 157, 321-328. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-83140> <https://doi.org/10.1007/s12010-008-83140>
- Zarate, A., Florez, J., Angulo, E., Varela-Prieto, L., Infante, C., Barrios, F., Barraza, B., Gallardo, D.I. y Valdés J. (2017). *Burkholderia tropica* as a potential microalgal growth-promoting bacterium in the biosorption of mercury from aqueous solutions. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 1138-1149. <https://doi.org/10.4014/jmb.1611.11059> <https://doi.org/10.4014/jmb.1611.11059>
- Zhang, J., Zhou, F., Liu, Y., Huang, F. & Zhang, C. (2020). Effect of extracellular polymeric substances on arsenic accumulation in *Chlorella pyrenoidosa*. *Science and the Total Environment*, 704, e135368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135368> <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135368>
- 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*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 87, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.10.002>
- Zhou, G.J., Peng, F.Q., Zhang, L.J. y Ying, G.G. (2011). Biosorption of zinc and copper from aqueous solutions by two freshwater green microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus*. *Environmental Science and Pollution Research International*, 19, 2918-2929. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0800-9>

