



ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN PARA LAS CUENCAS DE DOS RÍOS URBANOS DE LLANURA MATANZA-RIACHUELO Y RECONQUISTA

LAURA DE CABO y PATRICIA L. MARCONI
EDITORAS

 VAZQUEZ
MAZZINI
EDITORES


Universidad
Maimónides


FUNDACIÓN DE HISTORIA NATURAL

**ESTRATEGIAS DE
REMEDIACIÓN
PARA LAS CUENCAS DE
DOS RÍOS URBANOS
DE LLANURA
MATANZA-RIACHUELO
y RECONQUISTA**



EDITORAS:
Laura de Cabo y Patricia L. Marconi

**ESTRATEGIAS DE
REMEDIACIÓN
PARA LAS CUENCAS DE
DOS RÍOS URBANOS
DE LLANURA
MATANZA-RIACHUELO
y RECONQUISTA**

 **VAZQUEZ
MAZZINI
EDITORES**

 **umai**
Universidad
Maimónides

AZARA
FUNDACIÓN DE HISTORIA NATURAL

Diseño de Tapa: Arq. Emiliano Fernandez (arq.fernandeze@gmail.com)

Agradecimientos: Msc. Arq. Sebastian Miguel (Lab. Bio-Ambiental de Diseño-UFL) por la asistencia en el diseño de la tapa.

Diseño: Fernando Vázquez Mazzini

Diagramación: Lorena Blanco

Fundación de Historia Natural Félix de Azara

Centro de Ciencias Naturales, Ambientales y Antropológicas

Universidad Maimónides

Hidalgo 775 - 7° piso (1405BDB) Ciudad Autónoma de Buenos Aires - República Argentina

Teléfonos: 011-4905-1100 (int. 1228)

E-mail: secretaria@fundacionazara.org.ar

Página web: www.fundacionazara.org.ar

Las opiniones vertidas en el presente libro son exclusiva responsabilidad de su autor y no reflejan opiniones institucionales de los editores o auspiciantes.

Reservados los derechos para todos los países. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea este electrónico, químico, mecánico, electro-óptico, grabación, fotocopia, CD Rom, Internet o cualquier otro, sin la previa autorización escrita por parte de la editorial.

Primera Edición: 2021. Se terminó de imprimir en el mes de julio de 2021, en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

VAZQUEZ MAZZINI EDITORES

info@vmeditores.com.ar

www.vmeditores.com.ar

Cabo, Laura de

Estrategias de remediación para las cuencas de dos ríos urbanos de llanura : Matanza-Riachuelo y Reconquista / Laura de Cabo ; Patricia L. Marconi. - 1a ed. - Buenos Aires : Fundación de Historia Natural Félix de Azara, 2021.

344 p. ; 23 x 16 cm.

ISBN 978-987-3781-74-2

1. Ecología. I. Marconi, Patricia L. II. Título.

CDD 577.5

ÍNDICE

Estrategias de remediación para las cuencas de dos ríos urbanos de llanura Matanza-Riachuelo y Reconquista	
Editoras: Laura de Cabo y Patricia L. Marconi	9
1. ¿Qué es una cuenca? Modelos matemáticos en una cuenca de drenaje	
Rafael Santiago Seoane	11
2. La Gestión de Cuencas en la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA)	
Leonardo Pérez Esquivel	29
3. Agrobiotecnología, fitorremediación y sostenibilidad ambiental	
Alejandro Mentaberry	45
PARTE A - Características de la Cuenca Matanza Riachuelo: aspectos geográficos, sociales, ambientales, económicos y políticos	
ACUMAR.....	65
4. El estado ambiental de las riberas del Riachuelo (características físico-químicas y biológicas)	
Silvana Arreghini, Martha Bargiela, Cecilia Valea, Luis Do Carmo, Alicia Rendina, Roberto Serafini, Alicia F. de Iorio	79
5. Los metales pesados en las plantas palustres	
Silvana Arreghini, Cecilia Valea, Gonzalo Arnedillo, Silvana Auguet, Roberto Serafini, Alicia F. de Iorio.....	101
6. Cuenca alta - Fitorremediación aplicada a la restauración de riberas	
Natalia Rodriguez, Sofía Carusso, Marilé Gamarnik	117
7. Empleo de indicadores ambientales en la caracterización de un arroyo sometido a procesos de biorremediación: Ao. Morales (Cuenca Matanza-Riachuelo)	
Alberto Rodriguez Capítulo	125
8. Herramientas para la fiscalización ambiental de industrias - Análisis de los riesgos ambientales y caracterización de efluentes líquidos de industrias radicadas en la Cuenca Matanza Riachuelo	
Vera Mignaqui, Mariano Quinteros, Nicole Martinez, Laura Pessoa, Griselda Polla.....	145

9. Cuenca Alta, la acción de ACUMAR - Acciones para la recuperación ambiental de la Cuenca Matanza Riachuelo. Diseños y estrategias basados en servicios ecosistémicos de saneamiento	
ACUMAR.....	169
9.1. Restauración de riberas y bio-rollos. Intervención en área piloto “Puente Alsina”	
Laura de Cabo, Ana Faggi, Sebastián Miguel, Martha Mojica, Gabriel Basílico	179
9.2. Cuenca baja, la acción de la Agencia de Protección Ambiental	
Juan Manuel Mercadé, Roxana Bigi	203
9.3. Tecnologías de biorremediación implementadas hasta el momento en Lago Lugano y arroyo Cildáñez	
M. Daniela Groppa, Patricia L. Marconi	213
9.4. Experiencia piloto: el predio “Batalla de Villa Mayor”	
Patricia E. Perelman, Patricia L. Marconi, Laura I. de Cabo.....	231
9.5. Experiencia piloto sobre potencial captura de carbono y su contribución al cambio climático	
Walter Bejar.....	241
9.6. Proyecto de intervención y recomposición ambiental Saladita Norte	
Anahi Escala, Walter Bejar, Eugenio Coconier, Liria Alonso	251
9.7. Uso de libélulas para el monitoreo de la biodiversidad acuática y salud ambiental de la laguna Saladita Norte, Municipio de Avellaneda, Buenos Aires, Argentina	
Javier Muzón, Federico Lozano, Lucas Granato, Alejandro del Palacio, Lia Soledad Ramos	259
PARTE B - Características de la cuenca del río Reconquista: aspectos geográficos y ambientales	
Gabriel O. Basílico	279
10. Algunas ideas para el relevamiento de puntos de vuelco de efluentes líquidos en cuerpos de agua	
Gabriel O. Basílico	305
11. Tecnologías de biorremediación con microalgas	
Juan G. Sánchez Novoa, Laura I. de Cabo, Patricia L. Marconi	317
12. Tecnologías de biorremediación implementadas hasta el momento	
Juan G. Sánchez Novoa, Laura I. de Cabo, Patricia L. Marconi	327

ÍNDICE DE AUTORES

Alonso Liria, Coordinación de Impacto Socioeconómico, Coordinación de Calidad Ambiental Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Social. Dirección Técnica de ACUMAR; lalonso@acumar.gov.ar

Arnedillo Gonzalo, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; arnedill@agro.uba.ar

Arreghini Silvana, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; sarreghi@agro.uba.ar

Auguet Silvana, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; auguet@agro.uba.ar

Bargiela Marta, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; bargiela@agro.uba.ar

Basílico Gabriel, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET. Docente de la Universidad de Flores, de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y UCES; gabrielomabasilico@hotmail.com

Bejar Walter, Coordinación de Impacto Socioeconómico, Coordinación de Calidad Ambiental. Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Social. Dirección Técnica de ACUMAR; wbejar@acumar.gov.ar

Bigi Roxana, Gerencia Operativa de Determinaciones Ambientales y Laboratorio, Dirección General de Control Ambiental de la Agencia de Protección Ambiental. GCBA; roxanabigi@gmail.com

Carusso Sofia, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET; soficarusso@gmail.com

Coconier Eugenio, Coordinación de Impacto Socioeconómico, Coordinación de Calidad Ambiental. Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Social. Dirección Técnica de ACUMAR; ecoconier@acumar.gov.ar

de Cabo Laura, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET. Docente UFLO y UCES; lauradecabo64@gmail.com

De Iorio Alicia F., Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; aiorio@agro.uba.ar

del Palacio Alejandro, Laboratorio de Biodiversidad y Genética Ambiental (BioGeA), Universidad Nacional de Avellaneda; adelpalacio@undav.edu.ar

Do Carmo Luis, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; docarmo@agro.uba.ar

Escala Anahi, Coordinación de Impacto Socioeconómico, Coordinación de Calidad Ambiental. Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Social. Dirección Técnica de ACUMAR; aescala@acumar.gov.ar

Faggi Ana, Universidad de Flores y UCES; anamfaggi@gmail.com

Gamarnik Marilé, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET; gamarnik@agro.uba.ar

Granato A Lucas, Laboratorio de Biodiversidad y Genética Ambiental (BioGeA), Universidad Nacional de Avellaneda; lgranato@undav.edu.ar

Groppa M. Daniela, IQUIFIB-CONICET, FFyB, Universidad de Buenos Aires; danielagroppa@gmail.com

Lozano Federico, Laboratorio de Biodiversidad y Genética Ambiental (BioGeA), Universidad Nacional de Avellaneda; flozano@undav.edu.ar

Marconi Patricia L., CEBBAD-Universidad Maimónides, CONICET; marconi.patricialaura@maimonides.edu

Martinez Nicole, 3iA, UNSAM; sabdidarcienicole@gmail.com

Mentaberry Alejandro, Instituto de Biodiversidad y Biología Experimental Aplicada-CONICET; FCEyN, Universidad de Buenos Aires; amentaberry@yahoo.com.ar

Mercadé Juan Manuel, Gerencia Operativa de Determinaciones Ambientales y Laboratorio, Dirección General de Control Ambiental de la Agencia de Protección Ambiental. GCBA; mercadejm@gmail.com

Mignaqui Vera, 3iA, UNSAM; veramignaqui@yahoo.com

Miguel Sebastián, Universidad de Flores; sebastianmiguel.sm@gmail.com

Mojica Martha, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET; marthamojicaduran@gmail.com

Muzón Javier, Laboratorio de Biodiversidad y Genética Ambiental (BioGeA), Universidad Nacional de Avellaneda; jmuzon@undav.edu.ar

Perelman Patricia E., Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET. Directora Maestría Estudios Ambientales UCES; patriperelman@gmail.com

Pérez Esquivel Leonardo, Maestrando en etapa tesis Maestría en Gestión del Agua Fac. de Ciencias Veterinarias; leopesquivel@yahoo.com

Pessoa Laura, 3iA, UNSAM, lauramp2002@gmail.com

Polla Griselda, 3iA, UNSAM, griseldapolla@gmail.com

Quinteros Mariano, 3iA, UNSAM; marianoq997@gmail.com

Ramos Lía, Laboratorio de Biodiversidad y Genética Ambiental (BioGeA), Universidad Nacional de Avellaneda; lramos@undav.edu.ar

Rendina Alicia, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; arendina@agro.uba.ar

Rodrigues Capítulo Alberto, Instituto de Limnología Dr. R.A. Ringuélet-CONICET, FCNyM-UNLP; arcapitulo@gmail.com

Rodriguez Natalia, Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"-CONICET; natrodriguez@agro.uba.ar

Sánchez Novoa Juan G., CEBBAD-Universidad Maimónides y Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia"; juangabrielsancheznova@gmail.com

Seoane Rafael, Investigador Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA), FVET-UBA-CONICET; rafaelseoane@yahoo.com

Serafini Roberto, Cátedra de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; serafini@agro.uba.ar

Valea Cecilia, Universidad de Buenos Aires; valea@agro.uba.ar

11

Tecnologías de biorremediación con microalgas

Juan G. Sánchez Novoa, Laura I. de Cabo, Patricia L. Marconi

Las microalgas constituyen una amplia categoría de organismos que abarcan microalgas eucariotas fotoautotróficas y cianobacterias procariotas. Son capaces de crecer en zonas cálidas del trópico hasta zonas frías de montaña y se distribuyen tanto en ambientes de agua dulce como marinos. Se estima que existen entre 200,000–800,000 especies, de las cuales solo se han descrito alrededor de 50,000 (Renuka y col., 2014). La enorme diversidad de especies y ambientes en que estos microorganismos pueden crecer, representan una alta potencialidad para la obtención productos y servicios a través de múltiples aplicaciones biotecnológicas (por ejemplo, productos farmacéuticos, captura biológica de carbono y biomasa para bioenergía entre otras aplicaciones) (Mondal y col., 2019). Algunas de las principales ventajas de estos microorganismos son: el bajo costo en sus requisitos de crecimiento (luz solar y dióxido de carbono), su rol en el ecosistema, capacidad de bioacumulación con la formación de subproductos de valor agregado, no requieren tierras fértiles o agua utilizable en agricultura, creciendo incluso en lugares contaminados (Wen y col., 2017; Khan y col., 2019). Las microalgas han sido ampliamente estudiadas y utilizadas en biorremediación para la remoción de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y en la eliminación de sustancias tóxicas, como pesticidas, herbicidas, metales pesados, entre otros contaminantes (Trentini y col., 2017; Groppa y col., 2019; Mishraa y Mohantya, 2019; Cap. 4 y 9.3). La biomasa generada durante un tratamiento o proceso de biorremediación puede ser reutilizada en sistemas de producción de biocombustibles y/o en procesos de avicultura, acuicultura o agricultura, transformando esta actividad en autosustentable (Mehrabadi y col., 2015; Puyol y col., 2017).

A partir de la década de 1950 se publicaron los primeros trabajos de cultivo de microalgas del género *Chlorella sp.* para la obtención de biomasa microalgal rica en proteínas de alta calidad como alternativa para alimentación humana en sistemas abiertos denominados canales de flujo continuo o del inglés: "raceway ponds". Los sistemas *raceway* están constituidos por canales poco profundos (nivel de agua de 15-20 cm) en forma de circuito cerrado, en los que, el medio de cultivo es impulsado mediante paletas rotatorias que homogenizan los nutrientes y los microorganismos. Este sistema, generalmente requiere de grandes áreas de terreno (en el orden de hectáreas), aunque tienen como ventaja el bajo costo de producción de biomasa algal con múltiples aplicaciones desde la biorremediación de aguas contaminadas hasta la producción de alimento para consumo humano (Fernández-Linares y col., 2012). En los años posteriores, alrededor de las décadas del 70 y 80 se desarrolló un sistema de cultivo de *Spirulina sp.* en reactores cerrados comúnmente denominados fotobiorreactores, en los que el cultivo tiene poco o ningún contacto con la atmósfera con capacidad de 50 L (The National Academy of Science, 2012). Desde entonces, se han dedicado múltiples esfuerzos en el área de investigación para optimizar los rendimientos de la producción de biomasa a gran escala. Fernández-Linares y col. (2012) proponen utilizar la producción en masa de microalgas utilizando las tecnologías de fotobiorreactores cerrados (tanques tipo fermentador, fotobiorreactores tubulares y laminares) y reactores de estanque abierto tipo *raceway* para obtención de biomasa. A partir de este trabajo se ha extendido mundialmente como el método económicamente viable para la producción a gran escala de biomasa de microalgas. Sin embargo, aún existen problemas de ingeniería que deben ser resueltos para desarrollar sistemas mucho más eficientes para la producción de biomasa a gran escala y de bajo costo.

FACTORES PARA EL CRECIMIENTO

Las microalgas son microorganismos unicelulares fotosintéticos con un tamaño que varía entre 2 a 250 μm , tienen una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa mucho mayor que las plantas superiores con tiempos de duplicación inferiores a las 24 horas. Por lo tanto, la productividad de las microalgas está determinada, principalmente, por la intensidad y el tipo de luz, el pH del medio, la disponibilidad y concentración de nutrientes -principalmente CO_2 , N y P-, la densidad celular del cultivo, la temperatura, la contaminación y la posible depredación por otros organismos. Otros factores a considerar en la producción a gran escala de biomasa a partir de microalgas son (Fernández-Linares y col., 2012; Torzillo y Vonshak, 2013; Hernández y Labbé, 2014; Mehrabadi y col., 2015; Hernández-Melchor y col., 2017):

- la selección de la cepa, la cual dependerá del producto final deseado;
- la fuente de nutrientes (medio de cultivo o aguas residuales);
- la ubicación geográfica;
- el modo de operación (discontinuo-batch, semicontinuo o continuo)
- el sistema de cultivo, el cual puede ser de dos tipos:
 - a) reactores abiertos raceway como estanques abiertos y reactores de canalización, más simples y menos costosos donde se pueden producir cepas a prueba de contaminación;
 - b) fotobiorreactores cerrados como reactores tubulares o de placa plana con sus diversas configuraciones, en los que los productos de alto valor son producidos por cepas sensibles a la contaminación.

ALGAS COMO SISTEMA DE BIORREMEDIACIÓN

Debido a la alta potencialidad de aplicaciones, las microalgas han sido ampliamente estudiadas y han despertado gran interés en el campo de la biotecnología en el desarrollo de estrategias alternativas a los sistemas convencionales (físicos, químicos y biológicos) para el tratamiento de aguas residuales (Anastopoulos y Kyzas, 2015; Wen y col., 2017; Sayadi y col., 2019; Mondal y col., 2019). Entre ellas, la ficorremediación consiste en el uso de macro y microalgas para el saneamiento ambiental. Sin embargo, la producción a gran escala de biomasa algal plantea desafíos debido a los altos requerimientos de agua y nutrientes para su cultivo (Mishraa y Mohantya, 2019). Además, el aislamiento de cepas nativas se considera la base del tratamiento de aguas residuales por microalgas ya que tienen una capacidad inherente para aclimatarse a las condiciones del lugar y dan como resultado un crecimiento superior en las aguas residuales no tratadas (Wen y col., 2017).

Este enfoque puede abordar simultáneamente la biorremediación y generar materia prima de biomasa de alto valor para la producción de biocombustibles, al mismo tiempo que permite excluir el uso de tierras agrícolas de alta calidad o zonas densamente pobladas y los problemas de seguridad alimentaria (Mallick y col., 2016; Mondal y col., 2019).

Para elegir una cepa, se debe considerar una estrategia de selección en base a diversos criterios (Chisti, 2007; Fernández-Linares y col., 2012; Hu, 2013; Grobbelaar, 2013; Torzillo y Vonshak, 2013; Hernández y Labbé, 2014; Mohemani y col., 2015; Fernández y col., 2016; Yusoff y col., 2019).

Además, se debe tener en cuenta que la viabilidad técnica de cada sistema está influenciada por las propiedades particulares de la cepa de algas seleccionada, así como por las condiciones climáticas y los costos de la tierra y acceso al agua (Wen y col., 2017; Vasistha y col., 2019).

SISTEMA DE ESTANQUE ABIERTO

Los sistemas de producción de estanques abiertos se pueden clasificar en aguas naturales (lagos, lagunas y estanques) y en estanques o contenedores artificiales (*raceway* y geoceldas). Los estanques de canalización, del inglés *raceway*, son el sistema artificial más utilizado comercialmente, tienen forma ovalada en circuito cerrado generalmente entre 0.2 y 0.5 m de profundidad (Hernández y Labbé, 2014). El sistema está construido en hormigón o excavado en el suelo y puede cubrirse con un revestimiento de plástico blanco que mejora la captación de luz por parte de las algas (Fernández-Linares, y col., 2012; Zittelli, y col., 2013). Los estanques de canales requieren de grandes superficies (en el orden de hectáreas) (Hernández y Labbé, 2014). Se agitan a través de paletas o hélice, una bomba de aire funciona en todo momento para agitar y hacer circular la mezcla para evitar la sedimentación de algas, regular la remoción de O₂, estabilizar el crecimiento y la productividad de las algas (The National Academy of Science, 2012; Fernández y col., 2016; Leonardi, 2019). El requisito de CO₂ de las microalgas generalmente se satisface con el aire de la superficie, pero se suelen instalar aireadores sumergidos para mejorar la absorción de CO₂ (Brennan y Owende, 2010; Yusoff y col., 2019).

Las geoceldas son una variación del sistema de estanques abiertos, donde el material de fabricación suele ser plástico (rígido), la altura de la columna de agua es menor a 15 cm y la mezcla se puede realizar mediante una bomba sumergible de 15 W. Funcionan a modo de reactor en batch o discontinuo con instalación a cielo abierto *in situ* (Marconi y col., 2020; Sánchez-Novoa, 2020).

Las aplicaciones van desde la producción de biomasa de alto valor hasta biorremediación, la profundidad del sistema se mantiene en los rangos de operación de los *raceway*, sin embargo, un factor limitante es el tamaño del estanque inferior a los 10 000 m² debido a problemas mecánicos y de mezcla no homogéneos que se realiza por un brazo giratorio (Moheimani, y col., 2015; Ramos y Pizarro, 2018). Otro diseño disponible, pero menos común en sistemas abiertos es el sistema inclinado o de cascada, donde el cultivo en suspensión circula por gravedad en dos canales inclinados conectados entre sí, pero en direcciones opuestas que terminan en un tanque de retención, desde donde se recircula el cultivo por bombeo, logrando así una alta turbulencia (Zittelli y col., 2013; Leonardi, 2019).

Los sistemas de estanques abiertos requieren ambientes altamente selectivos debido a la amenaza inherente de contaminación por bacterias, otras especies de algas y protozoos. El monocultivo es posible, aunque solo un pequeño número de cepas de algas son adecuadas. Por ejemplo, las especies del género *Chlorella* (adaptable a medios ricos en nutrientes), *Dunaliella salina* (adaptable a muy alta salinidad) y *Spirulina* (adaptable a alta alcalinidad) prosperan bajo tales ejemplos de ambientes extremos. Con respecto a la productividad de la biomasa, los sistemas de estanques abiertos son menos eficientes en comparación con los fotobiorreactores cerrados. Esto puede atribuirse a varios factores determinantes, que incluyen pérdidas por evaporación, fluctuación de temperatura en los medios de crecimiento, deficiencias de CO₂, mezcla ineficiente, limitación de la luz y regímenes de lluvia que pueden diluir los nutrientes disponibles en el medio de cultivo (Brennan y Owende, 2010; Zittelli y col., 2013; Hernández y Labbé, 2014; Moheimani y col., 2015; Chisti, 2017; Yusoff y col., 2019).

BIORREMEDIACIÓN – PALABRAS FINALES

A lo largo de este libro, así como numerosos organismos internacionales, han hecho hincapié en lo imperioso de estudiar posibles metodologías que reduzcan la carga de contaminantes en cuerpos de agua (Ward y col., 2018; WWAP, 2018; WHO, 2019). Una posibilidad es la aplicación de tecnologías de biorremediación las cuales se fundamentan en la capacidad natural que poseen determinados microorganismos para incorporar contaminantes en sus procesos metabólicos y usarlos como fuente de energía o carbono para producción de biomasa (Dzionic y col., 2016; Mosa, 2016). Dentro de los microorganismos utilizados en los tratamientos de biorremediación se encuentran las microalgas (ficorremediación), las cuales han sido reconocidas como una alternativa eficaz de tratamiento para la remoción de nutrientes como el nitrógeno y fósforo (Mishraa y Mohantya, 2019; Trentini y col., 2017). Las microalgas también se emplean para la eliminación de sustancias tóxicas, como pesticidas, herbicidas y metales pesados, entre otros. La generación de biomasa puede ser reutilizada en sistemas de producción de biocombustibles y/o en procesos de avicultura, acuicultura o agricultura transformando esta actividad en autosustentable (Mehrabadi y col., 2015; Puyol y col., 2017).

A nivel mundial, los sistemas que surgen como una solución para el cultivo en masa de microalgas son: el sistema cerrado (fotobiorreactor) y el sistema abierto (estanques abiertos tipo *raceway*) (Vasistha y col., 2019). El sistema abierto *raceway* es el más utilizado para la producción de biomasa algal debido a sus ventajas de bajo costo energético, operativo y de mantenimiento aun cuando se requiere de grandes áreas para su funcionamiento (Fernández y

col., 2016). Por otro lado, el uso de geoceldas resulta apropiado ya que permite reducir el tamaño del sistema y obtener buenos rendimientos de remediación (Sánchez Novoa, 2020) lo que se convierte en una gran ventaja considerando la disponibilidad del uso del suelo y el elevado valor de los terrenos. Este enfoque puede abordar simultáneamente la biorremediación y generar materia prima de biomasa de alto valor, al mismo tiempo que permite excluir el uso de tierras agrícolas de alta calidad o zonas densamente pobladas (Malick y col., 2016; Mondal y col., 2019).

BIBLIOGRAFÍA

- Anastopoulos, I. y Kyzas, G., 2015. Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*.
- Brennan, L. y Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 14, pp. 557-577.
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, Volumen 25, p. 294–306.
- Dzionic, A., Wojcieszynska, D. y Guzik, U., 2016. Natural carriers in bioremediation: A review. *Electronic Journal of Biotechnology*.
- Fernández, I. y otros, 2016. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research*, Volumen 17, pp. 67-78.
- Fernández-Linares, L., Montiel-Montoya, J., A, M.-O. y Badillo-Corona, J., 2012. Production of biofuels obtained from microalgae. *Ra Ximhai*, 8(3), pp. 101-115.
- Grobbelaar, J., 2013. Inorganic Algal Nutrition. En: A. R. a. Q. Hu, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. s.l.:John Wiley y Sons, Ltd., pp. 123-133.
- Groppa, M. y otros, 2019. Optimization of a Bioremediation Strategy for an Urban Stream of Matanza-Riachuelo Basin. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 13(5), pp. 418-424.
- Hernández, A. y Labbé, J., 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), pp. 157-173.

- Hernández-Melchor, D. y otros, 2017. Producción a la intemperie de un consorcio microbiano fotosintético fijador de nitrógeno en cultivo por lote y semicontinuo en un fotobiorreactor de puente aéreo de cara plana. *Rev. Int. Contaminación. Ambiental. (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental)*, Volumen 33, pp. 73-81.
- Hu, Q., 2013. Environmental Effects on Cell Composition. En: A. R. a. Q. Hu, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. s.l.:John Wiley y Sons, Ltd, pp. 114-122.
- Khan, S., Siddique, R., Sajjad, W., Nabi, G., Hayat, K. M., Duan, P., & Yao, L. (2017). Biodiesel production from algae to overcome the energy crisis. *HA-YATI Journal of Biosciences*, 24(4), 163-16
- Leonardi, R., 2019. *Diseño, caracterización, modelado y optimización de fotobiorreactores destinados al cultivo de microalgas y la producción de metabolitos de interés tecnológico-biológico*. s.l.:Tesis para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ciencias Biológicas, U. Nacional del Litoral, Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas. pp. 161.
- Mallick, N., Bagchi, S., Koley, S. y Singh, A., 2016. Progress and Challenges in Microalgal Biodiesel Production. *Frontiers in Microbiology*, Volumen 7.
- Marconi, P. y otros, 2020. Development and testing of a 3D-printable polylactic acid device to optimize a water bioremediation process. *AMB Express*.
- Mehrabadi, A., Craggs, R. y Farid, M., 2015. Wastewater treatment high rate algal ponds for low-cost biofuel production.. *Bioresour. Technol.*, Volumen 184, p. 202–214.
- Mishraa, S. y Mohantya, K., 2019. Comprehensive characterization of microalgal isolates and lipid-extracted biomass as zero-waste bioenergy feedstock: An integrated bioremediation and biorefinery approach. *Bioresource Technology*, Issue 273, pp. 177-184.
- Moheimani, y otros, 2015. Past, Present and Future of Microalgae Cultivation Developments. En: *Biomass and Biofuels from Microalgae - Advances in Engineering and Biology*. s.l.:s.n.
- Mondal, M. y otros, 2019. Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants Using Microalgae. En: *NEW AND FUTURE DEVELOPMENTS IN MICROBIAL BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING*. s.l.:s.n., pp. 223-235.
- Mosa, K. S. I. K. K. H. M. y. D. O., 2016. Potential Biotechnological Strategies for the Cleanup of Heavy Metals and Metalloids. *Frontiers in Plan Science*.

- Puyol, D. y otros, 2017. Resource Recovery from Wastewater by Biological Technologies: Opportunities, Challenges, and Prospects.. *Frontiers in microbiology*.
- Ramos, R. y Pizarro, R., 2018. Crecimiento y capacidad de biorremediación de *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) cultivada en aguas residuales generadas en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, Abri, Vol. 53(Nº1), pp. 75-86.
- Renuka, N., Sood, A., Prasanna, R. y Ahluwalia, A., 2014. Phycoremediation of wastewaters: a synergistic approach using microalgae for bioremediation and biomass generation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Volumen 12, pp. 1443-1460.
- Sánchez-Novoa, J., 2020. *Bioprocesos de aguas contaminadas del Canal Bancalari, cuenca del Río Reconquista utilizando una cepa autóctona de Chlorella vulgaris inmovilizada en alginato dentro de estructuras 3D*. Buenos Aires, Argentina: Tesis de Grado. Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad del Salvador.
- Sayadi, M., Rashki, O. y Shahri, E., 2019. Application of modified *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* powder on the adsorption of heavy metals from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volumen 7.
- The National Academy of Science, 2012. *Sustainable Development of Algal Biofuels in the United States*. Washington, D.C.: s.n. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13437>.
- Torzillo, G. y Vonshak, A., 2013. Environmental Stress Physiology with Reference to Mass Cultures. En: R. a. Q. Hu., ed. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. s.l.:John Wiley y Sons, Ltd, pp. 90-113.
- Trentini, A. y otros, 2017. Biorremediación del lago lugano de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires por algas unicelulares – estudios preliminares. *Revista Terra Mundus*, 2 Diciembre.Issue 2.
- Vasistha, S., Khanra, A. y Rai, M., 2019. Progress and Challenges in Biodiesel Production from Microalgae Feedstock. En: *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. s.l.:s.n.
- Ward, M. H. y otros, 2018. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review.. *IJERPH*, 15(2-31).

- Wen, Y. y otros, 2017. Isolation of an indigenous *Chlorella vulgaris* from swine wastewater and characterization of its nutrient removal ability in undiluted sewage. *Bioresource Technology*, Volumen 243, pp. 247-253.
- WHO, 2019. *World Health Organization, El Agua, informe*, s.l.: s.n.
- WWAP, 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*, s.l.: s.n.
- Yusoff, F., Nagao, N., Imaizumi, Y. y Toda, T., 2019. Bioreactor for Microalgal Cultivation Systems: Strategy and Development. En: *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems, Biofuel and Biorefinery Technologies*. s.l.:Springer Nature Switzerland, pp. 117-159.
- Zittelli, G., Biondi, N., Rodolfi, L. y Tredici, M., 2013. Photobioreactors for Mass Production of Microalgae. En: A. R. a. Q. Hu, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. s.l.:John Wiley y Sons, Ltd., pp. 225-266.