

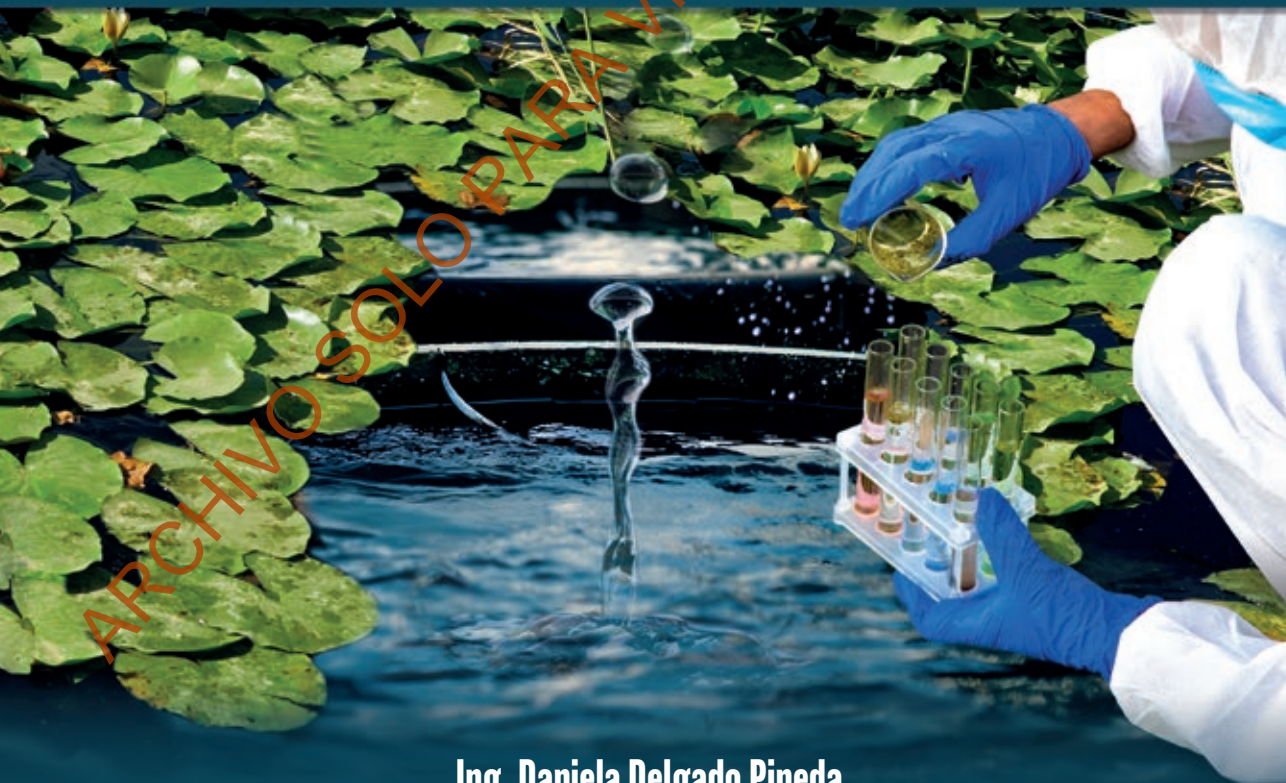


COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

COLECCIÓN INGENIERÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Biotecnología para el agua:

organismos y estrategias
en la recuperación de aguas residuales



Ing. Daniela Delgado Pineda

Ing. Ruly Terán Hilaes



DANIELA DELGADO PINEDA

Nació en Puno. Es Ingeniera Biotecnóloga por la Universidad Católica de Santa María y Maestra en Ciencias con mención en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Actualmente se desempeña como gestora de proyectos en la Universidad Católica San Pablo, promoviendo iniciativas de investigación e innovación.

Integra la red CATI y cuenta con reconocimiento como investigadora RENACYT. Su experiencia se enfoca en biotecnología ambiental, economía circular, valorización de residuos y desarrollo de soluciones sostenibles, destacando por su compromiso con la investigación aplicada y el desarrollo científico.



COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

COLECCIÓN INGENIERÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE EDICIÓN 2025

Biotecnología para el agua: organismos y estrategias en la recuperación de aguas residuales

Ing. Daniela Delgado Pineda

Ing. Ruly Terán Hilares

Lima, Perú

2026



COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

COLECCIÓN INGENIERÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE, EDICIÓN 2025

Biotecnología para el agua: organismos y estrategias en la recuperación de aguas residuales

© Ing. Daniela Delgado Pineda

© Ing. Ruly Terán Hilares

Primera edición digital: junio 2026

Editado por:

© Colegio de Ingenieros del Perú - Consejo Nacional

Av. Arequipa 4947, Miraflores, Lima, Perú

www.cip.org.pe | Telf. 445-6540 / 446-6997

Coordinadora del Fondo Editorial:

Melizza Caja Olórtegui

Derechos reservados

Diseño y diagramación:

Tarea Asociación Gráfica Educativa,

RUC: 20125831410

Depósito Legal N.º 2026-05560

ISBN: 978-612-99428-4-1

El Colegio de Ingenieros del Perú no se verá afectado por el contenido de la obra. En consecuencia, los autores son responsables ante cualquier controversia o conflicto de interés.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso de los editores y/o autores.

Publicado en el Perú



COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

**DIRECTIVA NACIONAL
2025 - 2027**

Ing. Jaime Antonio Ruiz Béjar
DECANO NACIONAL

Zootecnista
CIP: 56888

Ing. Carlos Manuel Burgos Montenegro
VICEDECANO NACIONAL

Civil
CIP: 39825

Ing. Azucena Mariana Santa María Muro
DIRECTORA SECRETARIA NACIONAL

Civil
CIP: 42715

Ing. Norman Jesús Beltrán Castañón
DIRECTOR TESORERO NACIONAL

Mecánico Electricista
CIP: 77541

Ing. María Elizabeth Bejarano Meza
DIRECTORA PROSECRETARIA NACIONAL

Química
CIP: 45805

Ing. Carlos Fidel Ponce Sánchez
DIRECTOR PROTESORERO NACIONAL

Industrial
CIP: 77772

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

«La biotecnología aplicada al agua desempeña un papel clave en la recuperación de ecosistemas acuáticos y en la promoción del desarrollo sostenible, al permitir el tratamiento, reutilización y valorización de las aguas residuales».
(UNESCO, 2017).

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

ÍNDICE

Presentación	21
Prefacio	23
Introducción	25
Capítulo 1	
Crisis global del agua y gestión sostenible de los recursos hídricos	27
1.1. La crisis global del agua y sus desafíos ambientales.....	27
1.1.1. Disminución de los recursos hídricos.....	28
1.1.2. Impacto en la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos	29
1.1.3. Impacto en la vida marina	29
1.1.4. Desafíos en la seguridad hídrica y alimentaria	30
1.1.5. Cambio climático y eventos extremos	31
a) Impactos sobre la precipitación y sistemas monzónicos	32
b) Impactos en los recursos hídricos criosféricos.....	33
c) Cambios en los recursos hídricos superficiales	33
d) Cambios en los recursos hídricos subterráneos	33
1.1.6. Soluciones y estrategias de mitigación	34
a) Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH)	34
b) Tecnologías de reutilización, tratamiento avanzado y desalinización	35
c) Agricultura sostenible y uso eficiente del agua.....	35
d) Protección y restauración de ecosistemas acuáticos.....	35
1.1.7. Aprovechamiento de aguas residuales para la recarga de acuíferos subterráneos.....	36

Capítulo 2

Contaminación del agua y métodos de tratamiento 39

2.1. Tipos de contaminantes en aguas residuales	39
2.1.1. Contaminantes orgánicos	40
a) Compuestos farmacéuticos y productos de cuidado personal (PPCP)	40
b) Compuestos orgánicos volátiles (COV)	41
2.1.2. Nutrientes	41
2.1.3. Patógenos	41
2.1.4. Metales pesados	41
2.1.5. Compuestos químicos sintéticos	42
a) Productos farmacéuticos	42
b) Productos de cuidado personal.....	42
c) Pesticidas y herbicidas	42
2.1.6. Microplásticos	42
2.2. Fuentes de contaminación y su impacto ambiental	44
2.2.1. Contaminación industrial y minera	44
2.2.2. Contaminación por actividades agropecuarias.....	45
2.2.3. Contaminación por residuos plásticos y microplásticos.....	45
2.2.4. Contaminación atmosférica y cambio climático.....	46
2.2.5. Contaminación por residuos sólidos urbanos.....	46
2.3. Métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales	47
2.3.1. Tratamiento primario	47
a) Rejas y tamices.....	47
b) Desarenadores.....	48
c) Decantadores primarios	48
2.3.2. Tratamiento secundario	48
a) Lodos activados	48
b) Filtros percoladores.....	48
c) Lagunaje o estanques de estabilización	49
d) Biorreactores de membrana (MBR)	49
2.3.3. Tratamiento terciario	49
a) Filtración con membranas.....	49
b) Adsorción con carbón activado	49
c) Desinfección.....	50
d) Tecnologías combinadas	50

2.3.4. Tendencias y avances en el tratamiento de aguas residuales	50
a) Sistemas de tratamiento descentralizados	50
b) Procesos de bioelectroquímica.....	50
c) Integración de biotecnología y métodos avanzados	51
2.4. Limitaciones de los tratamientos físico-químicos	51
a) Generación de residuos secundarios	51
b) Altos costos operativos y de mantenimiento.....	51
c) Ineficiencia frente a contaminantes emergentes.....	52
d) Alto consumo energético	52
e) Impacto ambiental de los subproductos generados.....	52

Capítulo 3

Biotechnología en el tratamiento de aguas residuales

3.1. Conceptos básicos de biotecnología aplicada al agua.....	55
a) Biorremediación	55
b) Biofiltración.....	55
c) Tratamiento con microalgas.....	56
d) Biorreactores de membrana (MBR)	56
e) Fitorremediación	56
3.2. Ventajas de los sistemas biológicos sobre los tradicionales	56
a) Mayor sostenibilidad ambiental	57
b) Eficiencia en la eliminación de contaminantes	57
c) Tecnologías biológicas aplicadas en la remediación de microplásticos en aguas residuales.....	57
d) Menor consumo energético y costos operativos.....	59
e) Producción de subproductos valiosos y economía circular.....	60
f) Adaptabilidad y escalabilidad	60
g) Reducción de subproductos tóxicos	60
h) Resistencia y resiliencia ante variaciones de carga contaminante.....	61
3.3. Factores que influyen en la eficiencia de la biorremediación.....	61
a) Condiciones físico-químicas del medio	61
b) Tipo y concentración de contaminantes.....	62
c) Composición y diversidad microbiana	63
d) Disponibilidad de nutrientes.....	64
3.3.5. Estrategias de optimización en biorremediación.....	64
a) Uso de biorreactores avanzados.....	65

b) Inmovilización de microorganismos.....	65
c) Aplicación de herramientas ómicas	65
3.3.6. Estrategias de optimización basadas en metagenómica y metatranscriptómica	65
a) El papel de la metagenómica en la biorremediación	65
b) Optimización a partir de la metagenómica.....	66
c) Complemento de la metatranscriptómica	66
d) Perspectivas futuras	66
3.4. Caracterización de un efluente industrial con contaminantes emergentes...	67

Capítulo 4

Organismos utilizados en el tratamiento de aguas	69
4.1. Microalgas y su rol en la biorremediación	70
4.2. Mecanismos de biorremediación en microalgas	70
4.2.1. Bioadsorción.....	70
4.2.2. Bioacumulación.....	71
4.2.3. Biotransformación	72
4.2.4. Fitoextracción	72
4.2.5. Biodegradación	72
4.3. Principales especies de microalgas utilizadas en biorremediación.....	72
4.3.1. <i>Chlorella vulgaris</i>	72
4.3.2. <i>Scenedesmus obliquus</i>	73
4.3.3. <i>Spirulina platensis</i>	74
4.3.4. <i>Dunaliella salina</i>	74
4.3.5. <i>Nannochloropsis sp.</i>	74
4.3.6. <i>Battarionia braunii</i>	74
4.4. Producción de biomasa con valor agregado.....	75
4.4.1. Producción de biocombustibles	75
4.4.2. Fertilizantes y productos agrícolas.....	76
4.4.3. Cosméticos y productos farmacéuticos.....	76
4.4.4. Bioplásticos	76
4.5. Métodos de cultivo	76
4.5.1. Sistemas abiertos de cultivo	76
a) Estanques de cultivo (<i>Pond cultivation</i>)	77
4.5.2. Sistemas cerrados de cultivo.....	77
a) Fotobiorreactores horizontales (<i>Horizontal photobioreactors</i>)	77

4.5.3. Fotobiorreactores de película delgada (<i>Thin-film Photobioreactors</i>)...	78
4.6. Métodos de cosecha de microalgas.....	78
4.6.1. Centrifugación	79
4.6.2. Floculación	79
4.6.3. Filtración.....	79
4.6.4. Flotación por aire disuelto (DAF)	80
4.7. Aplicaciones en el secuestro de CO ₂	80
4.7.1. Mecanismo de secuestro de CO ₂ por microalgas.....	80
4.7.2. Sistemas de cultivo para el secuestro de CO ₂	81
a) Sistemas abiertos (estanques y lagos)	81
b) Fotobiorreactores cerrados	81
4.7.3. Ventajas del secuestro de CO ₂ con microalgas.....	82
4.7.4. Desafíos del secuestro de CO ₂ con microalgas.....	82
4.8. Enfoque integrado para la remediación de aguas residuales y la producción de biofertilizantes con <i>Chlorella vulgaris</i>	83
4.8.1. Eficiencia del sistema microalgal en la remediación de aguas residuales.....	83
4.8.2. Producción y características de la biomasa microalgal.....	84
4.8.3. Aplicación de la biomasa como biofertilizante.....	84
4.8.4. Impacto ambiental, económico y contribución al desarrollo sostenible.....	84
4.8.5. Alcances y proyecciones del enfoque integrado	84
4.9. Caso aplicado. Selección del proceso biológico según tipo de efluente	85

Capítulo 5

Bacterias y su acción en la biodegradación de aguas residuales

5.1. Desnitrificación y eliminación de materia orgánica.....	87
5.2. Procesos aeróbicos y anaeróbicos en biorreactores	88
5.3. Biorremediación de hidrocarburos y metales pesados.....	90
5.4. Principales géneros de bacterias en el tratamiento de aguas residuales	91
5.4.1. Género <i>Pseudomonas</i>	91
5.4.2. Género <i>Alcaligenes</i>	92
5.4.3. Género <i>Bacillus</i>	92
5.4.4. Género <i>Nitrosomonas</i> y <i>Nitrobacter</i>	92

5.4.5. Género <i>Paracoccus</i>	93
5.4.6. Género <i>Rhodococcus</i>	93
5.4.7. Género <i>Clostridium</i>	93
5.4.8. Género <i>Thiobacillus</i>	94
5.5. Tipos de biorreactores utilizados en el tratamiento de aguas residuales....	94
5.5.1. Biorreactores de lecho fijo (FBR)	94
5.5.2. Reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB)	95
5.5.3. Biorreactores de membrana (MBR).....	96
5.5.4. Biorreactores de lecho móvil (MBBR).....	96
5.5.5. Biorreactores secuenciales (SBR)	97
5.6. Caso aplicado: Dimensionamiento preliminar de un reactor UASB para la industria alimentaria	98

Capítulo 6

Hongos y su capacidad de remoción de contaminantes 101

6.1. Enzimas ligninolíticas y su acción en la degradación	102
6.2. Tipos de hongos utilizados en la remoción de contaminantes	103
6.2.1. <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	103
6.2.2. <i>Trametes versicolor</i>	103
6.2.3. <i>Pleurotus ostreatus</i>	103
6.2.4. <i>Ganoderma lucidum</i>	104
6.2.5. <i>Aspergillus niger</i>	104
6.2.6. <i>Fusarium solani</i>	104
6.3. Eliminación de fármacos y compuestos emergentes	104
6.4. Aplicaciones en el tratamiento de aguas industriales.....	105
6.5. Caso aplicado: Tratamiento de efluente textil mediante <i>Trametes versicolor</i>	106

Capítulo 7

Plantas acuáticas y su papel en la fitorremediación.....109

7.1. Mecanismos de absorción y acumulación de contaminantes	109
7.1.1. Absorción radicular y foliar.....	110
7.1.2. Bioacumulación.....	110
7.1.3. Fitoestabilización	110

7.1.4. Fitotransformación	111
7.1.5. Rizofiltración	111
7.1.6. Fitoextracción	111
7.1.7. Fitovolatilización	112
7.2. Uso en humedales artificiales	112
7.2.1. Humedales artificiales de flujo superficial.....	113
7.2.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial	115
7.2.3. Humedales artificiales híbridos	116
7.3. Casos de éxito en la recuperación de ecosistemas acuáticos.....	117
7.3.1. Lago Victoria, África.....	117
7.3.2. Río Bogotá, Colombia.....	118
7.3.3. Parque Natural de la Albufera, España.....	118
7.4. Caso aplicado: Diseño de un humedal artificial para una comunidad rural	119

Capítulo 8

Innovaciones biotecnológicas para la depuración de aguas

8.1. Lagunas de estabilización con organismos biológicos	121
8.1.1. Lagunas aeróbicas	122
8.1.2. Lagunas anaeróbicas	122
8.1.3. Lagunas facultativas	123
8.2. Fotobiorreactores para la producción de biomasa y tratamiento de aguas	124
8.2.1. Tipos de fotobiorreactores	124
8.2.2. Fotobiorreactores de burbujeo	124
8.2.3. Fotobiorreactores de columna vertical.....	125
8.2.4. Fotobiorreactores de membrana.....	125
8.3. Ventajas de los fotobiorreactores	125
8.4. Desventajas.....	126
8.5. Biofiltros y biopelículas microbianas	126
8.5.1. Formación y funcionamiento de las biopelículas microbianas	126
8.5.2. Procesos de remoción de contaminantes en biofiltros.....	127
a) Nitrificación	127
b) Desnitrificación	127

c) Degradación de materia orgánica.....	128
8.5.3. Tipos de biofiltros.....	128
a) Biofiltros de lecho fijo.....	128
b) Biofiltros de lecho móvil (MBBR, <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i>).....	128
c) Biofiltros de lecho fluido.....	128
8.5.4. Ventajas y limitaciones de los biofiltros	129
8.5.5. Principales especies microbianas asociadas	130
a) <i>Nitrosomonas europaea</i>	130
b) <i>Nitrobacter winogradskyi</i>	130
c) <i>Paracoccus denitrificans</i>	130
d) <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	130
8.6. Vermifiltros y lombrifiltración	130
8.7. Mecanismo de funcionamiento de los vermifiltros	131
8.9. Especies de lombrices y microorganismos asociados.....	132
8.9.1. <i>Eisenia fetida</i> (lombriz roja californiana)	133
8.9.2. <i>Eudrilus eugeniae</i> (lombriz africana)	135
8.9.3. Ventajas de la vermifiltración.....	136
8.9.4. Desventajas de la vermifiltración.....	136
8.10. Caso aplicado: Aplicación de un vermifiltro para aguas domésticas	137

Capítulo 9

Biotecnologías avanzadas y perspectivas futuras en el tratamiento de aguas.....139

9.1. Desarrollo de nuevos organismos modificados genéticamente.....	139
9.2. Organismos modificados para la degradación de contaminantes específicos.....	140
9.2.1. Bacterias modificadas genéticamente (BMG)	140
a) <i>Escherichia coli</i> modificada	141
b) <i>Pseudomonas putida</i> KT2440	141
c) <i>Deinococcus radiodurans</i>	141
9.2.2. Hongos modificados genéticamente.....	141
a) <i>Trametes versicolor</i> modificado.....	142
b) <i>Aspergillus niger</i> modificado mediante CRISPR-Cas9.....	142
9.2.3. Microalgas modificadas genéticamente en el tratamiento de aguas residuales.....	142

a) <i>Chlorella vulgaris</i> modificada.....	142
b) <i>Synechocystis sp.</i> modificada	142
9.3. Organismos modificados para la eliminación de metales pesados	143
9.3.1. Bacterias modificadas genéticamente para remoción de metales pesados	143
a) <i>Bacillus subtilis</i> con genes de fitoquelatinas	143
b) <i>Escherichia coli</i> con genes de metilotropía.....	143
c) <i>Cupriavidus metallidurans</i> modificada genéticamente.....	144
d) <i>Pseudomonas fluorescens</i> con genes de resistencia a metales pesados	144
e) <i>Shewanella oneidensis</i> modificada para la reducción de cromo hexavalente	144
9.3.2. Importancia y proyección de estas tecnologías.....	145
9.4. Consideraciones éticas y regulatorias.....	145
9.5. Integración de biotecnología con nanotecnología en la remediación	146
9.5.1. Uso de nanomateriales en la remediación ambiental	146
a) Biochar derivado de residuos agrícolas	146
b) Nanotubos de carbono.....	147
c) Grafeno y óxido de grafeno.....	147
d) Nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI)	147
9.5.2. Aplicación de microorganismos inmovilizados en nanomateriales.....	147
a) Bacterias degradadoras de hidrocarburos.....	147
b) Hongos con capacidad de bioadsorción de metales pesados... ..	148
c) Microalgas inmovilizadas en nanopartículas de sílice.....	148
9.5.3. Beneficios y desafíos de la integración biotecnológica y nanotecnológica.....	148
9.6. Economía circular y aprovechamiento de subproductos.....	149
9.6.1. Estrategias biotecnológicas para el aprovechamiento de subproductos	149
9.7. Desafíos en la implementación a gran escala	150
9.8. Biorremediación aplicada a desastres ambientales: el caso de los derrames de hidrocarburos.....	151
9.8.1. Contexto y magnitud de los derrames de hidrocarburos.....	151
9.8.2. Principios biotecnológicos de la biorremediación en derrames petroleros.....	151

9.8.3. Microorganismos clave en la degradación de hidrocarburos	152
9.8.4. Condiciones de proceso y razonamiento aplicado	152
9.8.5. Limitaciones, desafíos y enfoque integral	153

Referencias bibliográficas	155
---	------------

Glosario de términos	169
-----------------------------------	------------

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Principales contaminantes del agua residual	40
Figura 2.	Tratamientos convencionales de aguas residuales.....	47
Figura 3.	Tecnologías aplicadas en la biotecnología del agua: biorremediación, fitorremediación y biofiltración.....	54
Figura 4.	Diversas fuentes de microplásticos en aguas residuales, como fibras textiles, productos de cuidado personal, plásticos industriales y agrícolas, junto con la degradación de plásticos mayores y el desgaste de neumáticos.....	58
Figura 5.	Microorganismos empleados en procesos biotecnológicos para la depuración, recuperación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico	70
Figura 6.	Mecanismos de biorremediación en microalgas	71
Figura 7.	Cultivo semicontinuo integrado para tratar aguas residuales porcinas	73
Figura 8.	Rendimiento de un reactor híbrido anaeróbico-aeróbico a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales porcinas	89
Figura 9.	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> como activador para enriquecer consorcios desnitrificadores de alta eficiencia para el tratamiento de aguas residuales.	91
Figura 10.	Micorremediación de aguas residuales.....	102

Figura 11. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación..... 113

Figura 12. Principales componentes y procesos depurativos en humedales artificiales..... 114

Figura 13. Diagramas esquemáticos de diferentes tipos de configuraciones de vermifiltros, mostrando la organización estructural y los componentes principales empleados en su diseño y funcionamiento 131

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

PRESENTACIÓN

El agua es un recurso vital y limitado, cuya calidad y disponibilidad son determinantes para la salud de los ecosistemas, la producción agrícola, la industria y la vida humana. La biotecnología aplicada al agua surge como una herramienta estratégica para enfrentar los desafíos de la contaminación y la escasez hídrica, lo que permite la recuperación y depuración de cuerpos de agua de manera eficiente, sostenible y basada en evidencia científica.

Este libro, *Biotecnología para el agua: organismos y estrategias en la recuperación de aguas residuales*, ofrece una revisión integral de las tecnologías biológicas empleadas en el tratamiento de aguas residuales, destacando el uso de microalgas, organismos que han demostrado un alto potencial para remover contaminantes, reciclar nutrientes y mejorar la calidad del agua. A partir de este enfoque, se presentan resultados de investigaciones recientes, análisis comparativos y aplicaciones prácticas que permiten evidenciar cómo la biotecnología puede transformar la gestión de recursos hídricos en soluciones sostenibles y resilientes.

Además, el libro enfatiza la importancia de la innovación tecnológica y la sostenibilidad ambiental, alineándose con los principios del desarrollo sostenible y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en la gestión responsable del agua, la protección de ecosistemas acuáticos y la promoción de prácticas ambientales responsables.

Esta obra está dirigida a profesionales, investigadores, docentes y estudiantes de ingeniería, biotecnología y ciencias ambientales, así como a gestores y tomadores de decisiones en el ámbito de la gestión del agua. Su propósito es difundir conocimiento actualizado, fomentar la investigación aplicada y mostrar cómo la biotecnología puede convertirse en un motor para soluciones ambientales sostenibles, replicables y basadas en evidencia científica.

En síntesis, el libro busca integrar teoría, práctica e investigación para demostrar que la aplicación de la biotecnología al tratamiento de aguas residuales no solo mejora la calidad ambiental, sino que también contribuye de manera significativa al desarrollo sostenible, consolidando un puente entre innovación, ciencia y bienestar social.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

PREFACIO

El agua es un recurso esencial para la vida en el planeta, y su acceso en cantidad y calidad adecuadas constituye un derecho fundamental de la humanidad. Sin embargo, la contaminación y el uso desmedido de este recurso han generado una crisis global sin precedentes, afectando tanto la disponibilidad de agua potable como la salud de los ecosistemas acuáticos. Frente a este desafío, la biotecnología aplicada al tratamiento y recuperación de aguas residuales se presenta como una disciplina estratégica e innovadora, capaz de ofrecer soluciones sostenibles que integren la ciencia, la tecnología y el cuidado ambiental.

El objetivo de este libro es proporcionar un análisis integral de las tecnologías biológicas empleadas en la gestión del agua, abordando desde los principios científicos que sustentan los procesos biológicos hasta casos concretos de éxito en la remediación de cuerpos hídricos contaminados. Se destacan estrategias basadas en microorganismos, enzimas, plantas acuáticas y, especialmente, microalgas, que han demostrado ser altamente eficientes en la eliminación de contaminantes, la recuperación de nutrientes y la mejora de la calidad del agua, reduciendo la dependencia de tratamientos químicos convencionales.

A lo largo de sus capítulos, se presentan resultados de investigaciones recientes que evidencian la eficacia de estas tecnologías biológicas y se analizan sus aplicaciones prácticas en distintos contextos. También se discuten los desafíos que persisten en su implementación a gran escala, así como la necesidad de fortalecer la inversión en innovación, la regulación ambiental y la transferencia tecnológica, con el fin de garantizar soluciones viables, replicables y sostenibles.

Esta obra está dirigida a investigadores, profesionales del sector ambiental, responsables de políticas públicas y estudiantes interesados en la biotecnología aplicada al agua. Su propósito es ofrecer una visión completa de las herramientas biotecnológicas disponibles y su potencial para promover la sostenibilidad hídrica y, así, fomentar prácticas que minimicen el impacto ambiental y optimicen el uso de este recurso vital.

La crisis del agua nos desafía a replantear la manera en que gestionamos nuestros recursos naturales y a buscar enfoques más eficientes y sostenibles. La biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales, especialmente mediante microalgas, representa una oportunidad tangible para avanzar hacia un desarrollo sostenible, recuperando cuerpos de agua contaminados y promoviendo la resiliencia ambiental. A través del conocimiento, la innovación y la investigación aplicada, es posible generar soluciones que no solo mitiguen los efectos de la contaminación, sino que también transformen la forma en que interactuamos con nuestro entorno.

Con esta obra aspiramos a contribuir significativamente a la construcción de un futuro en el que el acceso al agua limpia y segura sea un derecho garantizado para todos, integrando ciencia, tecnología y sostenibilidad en cada acción hacia la gestión responsable de nuestros recursos hídricos.

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más valioso para la vida y el desarrollo humano, y su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas es esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas y las sociedades. No obstante, la contaminación y la sobreexplotación de los cuerpos de agua han comprometido gravemente su acceso seguro, al punto que se ha constituido en un problema ambiental de alcance global (Gleick, 2020). La crisis del agua es una de las problemáticas más urgentes del siglo XXI y demanda soluciones innovadoras y sostenibles, que permitan garantizar su acceso equitativo, su aprovechamiento racional y su gestión en un marco de desarrollo sostenible (UNESCO, 2021).

El crecimiento poblacional, la industrialización y las actividades agropecuarias han incrementado la carga de contaminantes vertidos en los cuerpos de agua, afectando su calidad y disponibilidad (Zhang et al., 2022). Los tratamientos convencionales de aguas residuales, basados principalmente en procesos físico-químicos, suelen ser costosos y generar residuos secundarios que requieren una disposición adecuada (Metcalf & Eddy, 2020). En este contexto, la biotecnología aplicada al tratamiento de aguas se presenta como una alternativa viable, al utilizar organismos vivos y sus productos metabólicos para la eliminación, recuperación y transformación de contaminantes (Rittmann & McCarty, 2021).

La aplicación de la biotecnología en el tratamiento de aguas residuales comprende una amplia gama de enfoques, incluyendo microorganismos, microalgas, plantas acuáticas, enzimas y procesos biológicos avanzados (Singh & Prerna, 2023). Entre ellos, los sistemas basados en microalgas destacan por su alta eficiencia en la remoción de materia orgánica, nutrientes y metales pesados, además de su potencial para la producción de biomasa útil en la agricultura, bioenergía y otros sectores (Chisti, 2021). De manera complementaria, el uso de humedales artificiales y biorreactores optimiza estos procesos, al promover un tratamiento más sostenible, económico y de menor impacto ambiental (Vymazal, 2022).

Este libro tiene como propósito ofrecer un análisis integral de las tecnologías biológicas aplicadas a la gestión del agua, combinando fundamentos teóricos con estudios de caso y ejemplos prácticos que evidencian la efectividad de estas soluciones. A lo largo de sus capítulos, se abordarán los principales desafíos de la contaminación del agua, los mecanismos biotecnológicos implementados para su remediación y las oportunidades emergentes para la aplicación de tecnologías más eficientes, sostenibles y alineadas con el desarrollo sustentable.

Se explorarán en detalle los diferentes enfoques biotecnológicos, desde la biodegradación de compuestos orgánicos hasta la biotransformación de contaminantes emergentes, destacando el papel de la ingeniería genética y metabólica en el diseño de microorganismos más eficientes para el tratamiento de aguas residuales. Así mismo, se analizarán las implicaciones ecológicas, económicas y sociales de estas tecnologías, considerando su contribución al paradigma de la economía circular, la recuperación de nutrientes y la generación de biomasa con aplicaciones productivas (Mata-Álvarez et al., 2021; Wagner et al., 2023).

La implementación de soluciones biotecnológicas no solo mejora la calidad del agua, sino que representa una estrategia integral para avanzar hacia un desarrollo sostenible, pues ofrece beneficios ambientales, sociales y económicos. Este libro busca convertirse en un recurso sólido para investigadores, académicos y profesionales interesados en la gestión sostenible del agua, al proporcionar ejemplos de éxito y análisis críticos.



CAPÍTULO 1

CRISIS GLOBAL DEL AGUA Y GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

1.1. LA CRISIS GLOBAL DEL AGUA Y SUS DESAFÍOS AMBIENTALES

El agua es un recurso esencial para la vida y para el funcionamiento de los ecosistemas y las actividades humanas. Sin embargo, en las últimas décadas el mundo enfrenta una crisis hídrica sin precedentes, marcada por la disminución de la disponibilidad de agua dulce, el deterioro de su calidad y el agravamiento de los efectos del cambio climático. Esta crisis afecta no solo a los ecosistemas acuáticos, sino también a la seguridad alimentaria, la salud pública y el desarrollo socioeconómico global (Du Plessis, 2022).

Uno de los factores más críticos es la gestión inadecuada de las aguas residuales. Se estima que el 44 % de las aguas residuales domésticas a nivel mundial no reciben tratamiento adecuado, y que alrededor del 80 % de las aguas residuales industriales y municipales se vierten directamente en cuerpos hídricos sin procesos de depuración. Esta situación ha provocado una degradación significativa de los ecosistemas de agua dulce, con una reducción de aproximadamente un tercio de la biodiversidad acuática mundial (Du Plessis, 2022). Además, la falta de saneamiento genera pérdidas económicas importantes, equivalentes hasta al 5 % del producto interno bruto en algunos países.

1.1.1. Disminución de los recursos hídricos

La disponibilidad de agua dulce está disminuyendo debido a factores como la sobreexplotación de acuíferos, el cambio en los patrones de precipitación y el retroceso de glaciares (Gleeson et al., 2022). Más de la mitad de los acuíferos principales del mundo se encuentran en riesgo de agotamiento crítico debido a la extracción insostenible (Famiglietti, 2021). Así mismo, el calentamiento global intensifica las sequías prolongadas, afectando la disponibilidad tanto de aguas superficiales como subterráneas (IPCC, 2023).

La creciente demanda de agua por el crecimiento poblacional, la urbanización y el desarrollo industrial incrementa la presión sobre los recursos hídricos. Para abordar esta problemática, la herramienta de huella hídrica, propuesta por Hoekstra (2002), permite cuantificar el volumen total de agua consumida en la producción de bienes y servicios, y se constituye de tal modo en una herramienta fundamental para la gestión sostenible del agua (Malla et al., 2024).

Componentes de la huella hídrica

- **Agua verde:** humedad del suelo utilizada por las plantas.
- **Agua azul:** agua superficial y subterránea empleada en riego, uso doméstico e industria.
- **Agua gris:** volumen necesario para diluir contaminantes hasta niveles ambientalmente seguros.

El análisis de la huella hídrica permite identificar sectores con mayor presión sobre los recursos, como la agricultura, responsable del 70 % del agua dulce extraída; la industria, con un 20 %, y el uso doméstico, con alrededor del 10 % (Malla et al., 2024). Cultivos como el arroz, el algodón y la caña de azúcar poseen altas huellas hídricas, al igual que industrias textiles, papeleras y químicas.

La huella hídrica también está influenciada por la geografía, el clima y el comercio internacional. Productos fabricados en regiones con escasez hídrica presentan huellas significativamente mayores que aquellos elaborados en zonas con abundancia del recurso.

1.1.2. Impacto en la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos

La alteración del ciclo hidrológico y la contaminación representan amenazas graves para la biodiversidad acuática. Diversas investigaciones demuestran que el aumento de la temperatura del agua y la eutrofización han reducido significativamente la diversidad de peces y fitoplancton, elementos clave para las cadenas tróficas (Moss et al., 2022).

La contaminación química, incluyendo la provocada por metales pesados, plásticos, microplásticos y contaminantes emergentes, deteriora los hábitats acuáticos y compromete la calidad del agua potable (Rochman et al., 2023).

Los desechos industriales, tanto peligrosos como no peligrosos, han incrementado su presencia desde la Revolución Industrial. Sustancias como solventes, pesticidas, pinturas, aceites y compuestos tóxicos como el percloroetileno (PCE) contaminan acuíferos y cuerpos superficiales, lo que afecta la reproducción de especies marinas y la seguridad del agua para consumo humano (Sharma et al., 2020).

1.1.3. Impacto en la vida marina

Los ecosistemas marinos se encuentran entre los más afectados por la contaminación hídrica y esta constituye uno de los desafíos ambientales más complejos de la crisis del agua. La liberación constante de contaminantes industriales, agrícolas y urbanos ha alterado los procesos ecológicos fundamentales, afectando la biodiversidad, las cadenas tróficas y el funcionamiento general de los mares y océanos (Sharma et al., 2020).

Un mecanismo crítico que explica la afectación de la fauna marina es la bioacumulación, proceso mediante el cual sustancias tóxicas como metales pesados (mercurio, plomo, cadmio), bifenilos policlorados (PCB), pesticidas organoclorados y otros contaminantes persistentes se concentran progresivamente en los tejidos de los organismos. Estas sustancias no se degradan fácilmente y, al ingresar en la cadena trófica, se amplifican mediante biomagnificación, alcanzando niveles tóxicos en depredadores superiores como peces grandes, aves marinas y mamíferos oceánicos.

La presencia de estos compuestos produce efectos adversos tales como:

- Alteraciones en la reproducción.
- Malformaciones en el desarrollo embrionario.

- Inmunosupresión.
- Disrupción endocrina.
- Mortalidad masiva en especies sensibles.

Además de los contaminantes químicos, la contaminación térmica ocasionada por la descarga de aguas industriales calientes o frías altera los gradientes térmicos naturales del océano. Muchos organismos marinos poseen rangos estrechos de tolerancia térmica, y los cambios abruptos dificultan procesos como la respiración, la alimentación y la reproducción. Por ejemplo, temperaturas elevadas pueden provocar la liberación prematura de huevos o impedir el desarrollo normal de larvas.

La turbidez generada por descargas industriales o erosión no controlada reduce la penetración de la luz solar, afectando directamente la fotosíntesis de la vegetación marina. Esto tiene un efecto dominó: plantas y algas disminuyen su productividad, lo que reduce la disponibilidad de oxígeno y altera las cadenas alimentarias.

Finalmente, los derrames de petróleo son uno de los fenómenos más devastadores. Estas capas superficiales impiden que la luz solar llegue a organismos fotosintéticos, perjudican gravemente a los corales, interfieren con la termorregulación y flotabilidad de animales marinos y producen toxicidad aguda en peces, mamíferos y aves (Sharma et al., 2020). El petróleo también se adhiere a las branquias de los peces, dificultando el intercambio gaseoso y aumentando la mortalidad.

En conjunto, estos factores demuestran que la crisis hídrica global trasciende la disponibilidad del agua dulce y compromete la integridad de los océanos, esenciales para la estabilidad climática y el bienestar humano.

1.1.4. Desafíos en la seguridad hídrica y alimentaria

La seguridad hídrica constituye uno de los problemas más urgentes a nivel global. Aunque el 70 % de la Tierra está cubierto por agua, solo una fracción mínima corresponde a agua dulce accesible. Según la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2024), aproximadamente 2200 millones de personas carecen de acceso a agua potable segura, lo que incrementa la prevalencia de enfermedades vinculadas al agua, como diarreas infecciosas, cólera, disentería, fiebre tifoidea y otras patologías gastrointestinales. Estas enfermedades afectan especialmente a poblaciones vulnerables de países en desarrollo, donde las infraestructuras de saneamiento son insuficientes.

La seguridad alimentaria está estrechamente ligada a la disponibilidad de agua. La agricultura representa cerca del 70 % del uso global de agua dulce, y utiliza este recurso fundamentalmente para el riego. El cambio climático ha alterado los ciclos hidrológicos, generando patrones de precipitación irregulares, sequías prolongadas y disminución de la disponibilidad hídrica en diversas regiones agrícolas de África, Asia y América Latina. Esta situación amenaza la producción sostenible de alimentos.

Diversos estudios advierten que la producción de cultivos básicos como trigo, maíz y arroz podría disminuir hasta en 20 % en las próximas décadas, como resultado de temperaturas más elevadas, sequías recurrentes y reducción de agua disponible para el riego (Boretti & Rosa, 2021). Estas disminuciones afectarían directamente la nutrición, los precios de los alimentos y la estabilidad económica de comunidades que dependen de la agricultura como principal medio de subsistencia.

La urbanización acelerada intensifica esta problemática. Muchas ciudades enfrentan una presión creciente sobre sus sistemas de abastecimiento de agua, sea por la proximidad de fuentes contaminadas, la sobreexplotación de acuíferos o la insuficiencia en la infraestructura hídrica. Además, la competencia entre los sectores agrícola, industrial y doméstico genera tensiones que obligan a gestionar el agua de manera más eficiente y equitativa.

Para enfrentar estos desafíos, organismos internacionales recomiendan:

- Mejorar la eficiencia en sistemas de riego y distribución.
- Implementar tecnologías de agricultura inteligente.
- Conservar ecosistemas claves como humedales y bosques.
- Invertir en saneamiento seguro y reciclaje de aguas residuales.
- Fortalecer las políticas de gestión integrada de recursos hídricos.

Estas medidas, combinadas con educación ambiental y cooperación internacional, son esenciales para garantizar la seguridad hídrica y alimentaria en un contexto de creciente vulnerabilidad climática.

1.1.5. Cambio climático y eventos extremos

El cambio climático actúa como un multiplicador de la crisis hídrica, al intensificar la variabilidad climática y alterar el equilibrio natural de los sistemas

hidrológicos. Los eventos extremos, incluyendo huracanes, inundaciones, sequías prolongadas y olas de calor, han aumentado en frecuencia y severidad durante las últimas décadas, con lo que han afectado la disponibilidad, la calidad del agua y la estabilidad de los ecosistemas (Kundzewicz et al., 2022).

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023) advierte que más de la mitad de la población mundial podría enfrentar estrés hídrico severo hacia el año 2070 si no se mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Entre los cambios más relevantes destacan:

- La alteración de los patrones globales de precipitación.
- El retroceso acelerado de glaciares en zonas montañosas.
- La intrusión salina en acuíferos costeros por aumento del nivel del mar.
- La disminución de la capacidad de regulación hídrica de ecosistemas sensibles.
- El incremento de eventos hidrológicos extremos que erosionan suelos y alteran cuencas.

Estos fenómenos afectan directamente a sistemas agrícolas, industriales, urbanos y naturales, en tanto incrementan la vulnerabilidad de países con infraestructura limitada y economías dependientes de recursos hídricos.

a) Impactos sobre la precipitación y sistemas monzónicos

Los cambios en la temperatura global alteran el ciclo del agua, pues incrementan la evaporación y modifican la distribución espacial y temporal de las lluvias. Regiones que dependen de sistemas monzónicos, como gran parte del sur de Asia, experimentan fluctuaciones que afectan la agricultura, la seguridad hídrica y la producción energética.

En India, más del 80 % de la precipitación anual ocurre durante el monzón de junio a septiembre, lo que convierte cualquier alteración en una amenaza directa para la producción de alimentos y la disponibilidad de agua (IPCC, 2021). El incremento de lluvias extremas provoca inundaciones, deslizamientos y contaminación de fuentes superficiales, mientras que la irregularidad del monzón acentúa las sequías agrícolas.

b) Impactos en los recursos hídricos criosféricos

La criosfera, integrada por glaciares, capas de hielo, plataformas, hielo marino y permafrost, se está degradando rápidamente debido al aumento de la temperatura global. El derretimiento de glaciares ha generado:

- Aumentos temporales en la escorrentía.
- Formación de lagos glaciares inestables.
- Mayor riesgo de desbordamientos repentinos.
- Disminución futura del agua disponible para millones de personas.

Regiones como el Himalaya, los Andes y los Alpes dependen de los glaciares como reservorios naturales que regulan el suministro hídrico estacional. Su retroceso compromete la disponibilidad de agua para riego, consumo humano y generación hidroeléctrica (IPCC, 2021).

c) Cambios en los recursos hídricos superficiales

Los sistemas fluviales son altamente sensibles a la variabilidad climática. La temperatura y la precipitación influyen directamente en el caudal de los ríos, al provocar:

- Aumentos de caudal en regiones húmedas.
- Reducciones sustanciales en zonas áridas o semiáridas.
- Una mayor frecuencia de inundaciones repentinas por lluvias intensas.
- Periodos prolongados de bajo caudal durante sequías.

Modelos hidrológicos proyectan reducciones significativas en los caudales futuros en regiones como Australia, Nepal, Grecia o la meseta tibetana de Qinghai (IPCC, 2021). Esto impacta directamente sobre actividades como pesca, navegación, agricultura y abastecimiento urbano.

d) Cambios en los recursos hídricos subterráneos

Los acuíferos, fundamentales para el abastecimiento en muchas regiones, también están siendo afectados. El aumento de temperatura y la variabilidad de precipitación reducen la recarga natural, al incrementar la evaporación y alterar los tiempos de infiltración.

El cambio climático produce, además:

- Fluctuaciones en los niveles freáticos.
- Deterioro de la calidad del agua subterránea.
- Alteración de conexiones entre aguas superficiales y subterráneas.
- Mayor vulnerabilidad a la intrusión salina en acuíferos costeros.

En regiones áridas, donde los acuíferos representan la única fuente confiable de agua, estos cambios suponen un riesgo severo para el abastecimiento y la seguridad hídrica.

1.1.6. Soluciones y estrategias de mitigación

La crisis hídrica global requiere un enfoque integral que combine avances tecnológicos, políticas públicas efectivas, conservación ambiental y educación ciudadana. Ninguna solución por sí sola es suficiente; se necesita una estrategia multidimensional que permita garantizar la disponibilidad y calidad del agua en el corto, mediano y largo plazo. En este contexto, organismos internacionales como la UNESCO y especialistas en recursos hídricos coinciden en que las soluciones deben centrarse en la gestión sostenible, la eficiencia en el uso del agua, la protección de los ecosistemas y la cooperación internacional (UNESCO, 2023; Gleick, 2024).

A continuación, se presentan las principales estrategias de mitigación ampliamente reconocidas y aplicadas a nivel global.

a) Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH)

La GIRH es un enfoque que busca gestionar el agua de manera coordinada entre sectores, territorios y actores, priorizando la sostenibilidad y la equidad. Este modelo promueve:

- La administración del agua por cuencas hidrográficas.
 - La asignación equitativa entre sectores (hogares, industria, agricultura).
 - El fortalecimiento de la gobernanza mediante marcos regulatorios sólidos.
- La participación comunitaria en el monitoreo y toma de decisiones.

Permite identificar conflictos por el uso del agua, priorizar intervenciones y garantizar que el recurso se utilice de manera eficiente y sostenible.

b) Tecnologías de reutilización, tratamiento avanzado y desalinización

La innovación tecnológica es fundamental para ampliar la disponibilidad hídrica, especialmente en regiones áridas o con estrés hídrico crónico. Entre las estrategias más relevantes se incluyen:

- Reutilización de aguas residuales tratadas. El reúso planificado permite:
 - Reducir la extracción de agua dulce.
 - Proveer agua para riego, industria y recarga de acuíferos.
 - Minimizar la contaminación de cuerpos receptores.
- Los sistemas de tratamiento terciario y avanzado (como filtración por membranas, ósmosis inversa o tratamiento con UV) garantizan calidad y seguridad en el agua reutilizada.

c) Agricultura sostenible y uso eficiente del agua

La agricultura es el principal consumidor de agua dulce a nivel mundial, por lo que la modernización de prácticas agrícolas es crucial. Las principales tecnologías incluyen:

- Riego por goteo y microaspersión, que pueden reducir entre 30 % y 60 % el uso del agua.
- Sistemas de riego inteligente, con sensores que determinan humedad del suelo y requerimientos hídricos.
- Agricultura de conservación, que mejora la infiltración, reduce la erosión y conserva humedad.
- Cultivos resistentes a sequía y prácticas de mejoramiento genético.

Estas medidas no solo aumentan la productividad agrícola, sino que, además, disminuyen la presión sobre los acuíferos y ecosistemas.

d) Protección y restauración de ecosistemas acuáticos

Los ecosistemas naturales como humedales, bosques ribereños y zonas de recarga desempeñan un papel fundamental en la regulación del agua. Su degradación es una de las causas principales de la disminución de la calidad hídrica. La restauración ecológica ofrece:

- Filtración natural de contaminantes.
- Regulación de crecidas.
- Mantenimiento de caudales ecológicos.
- Protección de la biodiversidad.

Los humedales, en particular, pueden eliminar sólidos suspendidos, nutrientes y metales pesados mediante procesos biológicos.

1.1.7. Aprovechamiento de aguas residuales para la recarga de acuíferos subterráneos

La recarga artificial de acuíferos mediante el uso de aguas residuales tratadas constituye una estrategia esencial para aumentar la disponibilidad de agua subterránea, especialmente en regiones afectadas por sequías prolongadas y sobreexplotación de acuíferos. Esta técnica consiste en infiltrar agua previamente tratada en el suelo, donde procesos naturales como la filtración, adsorción y degradación microbiana mejoran aún más su calidad antes de alcanzar el acuífero (Dillon et al., 2009).

La implementación de esta práctica requiere condiciones hidrogeológicas adecuadas, entre ellas:

- Porosidad y permeabilidad suficientes para permitir el movimiento del agua en el subsuelo.
- Conductividad hidráulica que favorezca la infiltración hacia el acuífero objetivo.
- Estratigrafía apropiada, evitando capas impermeables que impidan el flujo.
- Calidad del agua tratada que cumpla estándares mínimos para prevenir riesgos sanitarios o colmatación del suelo.

Una de las metodologías más utilizadas es el tratamiento suelo-acuífero (SAT), que emplea estanques de infiltración donde el agua tratada percola lentamente a través de capas de suelo. Este proceso proporciona una depuración adicional al eliminar sólidos, nutrientes y compuestos orgánicos, lo que mejora la calidad del agua infiltrada.

Los beneficios de la recarga artificial incluyen:

- Recuperación gradual de niveles freáticos.
- Reducción del estrés hídrico en temporadas secas.
- Mitigación de la intrusión salina en zonas costeras.
- Aprovechamiento eficiente de aguas residuales tratadas de acuerdo con un enfoque de economía circular.

No obstante, su implementación enfrenta desafíos como la necesidad de monitoreo continuo, posibles obstrucciones del suelo por colmatación y la percepción social respecto al uso de aguas residuales, lo que requiere estrategias de comunicación y educación para su aceptación.

Adaptación de prácticas agrícolas avanzadas

La agricultura representa el mayor uso de agua dulce a nivel global, por lo que la adaptación de prácticas agrícolas avanzadas es fundamental para enfrentar la creciente escasez hídrica. La modernización de los sistemas agrícolas permite mejorar la eficiencia del uso del agua, aumentar la productividad y reducir la presión sobre acuíferos y ecosistemas superficiales, especialmente en regiones áridas o con variabilidad climática marcada.

Entre las tecnologías más relevantes se encuentra el riego presurizado, que incluye métodos como el riego por aspersión y el riego por goteo. Estos sistemas suministran el agua de manera uniforme y controlada, con lo cual se optimiza su aprovechamiento y se reducen pérdidas por evaporación y escorrentía. Además, el riego por goteo puede disminuir significativamente el consumo de agua en comparación con prácticas tradicionales como el riego por inundación.

El uso de maquinaria agrícola equipada con sistemas GPS y sensores digitales también contribuye a una gestión más precisa del riego y la fertilización. Estos equipos permiten realizar aplicaciones basadas en la demanda real del cultivo, lo que reduce costos y evita el uso excesivo de recursos. Así mismo, la incorporación de tecnologías móviles facilita el monitoreo remoto de los sistemas de riego, de modo que permite a los agricultores controlar sus operaciones desde dispositivos electrónicos sin necesidad de desplazarse físicamente al campo.

Estas herramientas mejoran la eficiencia hídrica y energética, además de promover prácticas agrícolas adaptativas frente al cambio climático. No obstante, uno de los principales desafíos es su adopción a gran escala, ya que requieren inversión inicial, capacitación técnica y acceso a infraestructura adecuada.

En conjunto, la adaptación de prácticas agrícolas avanzadas constituye una medida estratégica para garantizar la sostenibilidad de la producción alimentaria y reducir la vulnerabilidad frente a escenarios de estrés hídrico creciente.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

CAPÍTULO 2

CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y MÉTODOS DE TRATAMIENTO

El agua es esencial para la vida, pero actividades humanas como la urbanización y la industria han incrementado su contaminación, con lo cual se ha atentado contra los ecosistemas y la salud pública. Este capítulo aborda los principales contaminantes de las aguas residuales, sus fuentes y los métodos de tratamiento disponibles; se destacan las limitaciones de los procesos físico-químicos y la importancia de incorporar soluciones más sostenibles como los tratamientos biológicos.

2.1 TIPOS DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales contienen una amplia variedad de contaminantes cuya concentración y composición dependen de su origen doméstico, industrial, agrícola o urbano. Estos contaminantes pueden clasificarse según su naturaleza química, su origen o los efectos que generan en el ambiente y en la salud humana. La correcta identificación de estas categorías es fundamental para seleccionar las tecnologías de tratamiento más adecuadas. En la figura 1 se presentan los principales tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales.

FIGURA 1.

Principales contaminantes del agua residual



Adaptado de Rasheed et al. (2019).

2.1.1. Contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos comprenden una amplia variedad de compuestos basados en carbono que ingresan a las aguas residuales desde actividades domésticas, industriales y agrícolas. Entre los principales se incluyen:

a) Compuestos farmacéuticos y productos de cuidado personal (PPCP)

Comprenden medicamentos, cosméticos, filtros solares, detergentes y otros productos de uso cotidiano que ingresan al alcantarillado tras su aplicación o eliminación. Muchos PPCP no son completamente removidos en las plantas de tratamiento convencionales, lo que permite su llegada a cuerpos de agua naturales. Su presencia es motivo de preocupación por su capacidad de generar efectos subletales en organismos acuáticos, alterar procesos fisiológicos y actuar como disruptores endocrinos (Khalid & Abdollahi, 2021).

b) Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Incluyen solventes, pinturas, adhesivos y otros productos químicos industriales que pueden evaporarse rápidamente. Los COV no solo contaminan el agua, sino también el aire, contribuyendo al surgimiento de problemas como la formación de ozono troposférico. En el agua pueden causar toxicidad directa a peces e invertebrados, y en ambientes industriales se consideran indicadores de contaminación peligrosa (Ahmed et al., 2015).

2.1.2. Nutrientes

Los nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, son esenciales para el crecimiento de plantas y microorganismos acuáticos. Sin embargo, las descargas excesivas provenientes de fertilizantes agrícolas, aguas domésticas con detergentes y efluentes ganaderos pueden alterar el equilibrio natural de los cuerpos de agua.

El exceso de nutrientes provoca eutrofización, proceso que genera proliferación descontrolada de algas y cianobacterias. Esto reduce el oxígeno disuelto, afecta la vida acuática, altera cadenas tróficas y deteriora la calidad del agua para consumo humano y recreación (Mateo-Sagasta, 2017).

2.1.3. Patógenos

Las aguas residuales pueden contener una gran diversidad de microorganismos patógenos, entre ellos bacterias (*Escherichia coli*, *Salmonella spp.*), virus (norovirus, rotavirus), protozoos (*Giardia*, *Cryptosporidium*) y helmintos.

Cuando las aguas contaminadas llegan a ríos, lagos o acuíferos sin tratamiento adecuado, pueden provocar brotes de enfermedades gastrointestinales, cutáneas y sistémicas. La presencia de patógenos es uno de los principales indicadores de riesgo sanitario en el agua y una de las razones por las cuales el tratamiento adecuado es indispensable (EPA, 2025).

2.1.4. Metales pesados

Elementos como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico se encuentran entre los contaminantes más peligrosos debido a su toxicidad y persistencia. Ingresan al agua a través de actividades mineras, procesos industriales, corrosión de tuberías y escorrentía urbana.

A diferencia de otros contaminantes, los metales pesados no se degradan y pueden acumularse en sedimentos y en los tejidos de organismos acuáticos. Este proceso de bioacumulación y biomagnificación incrementa su concentración a lo largo de la cadena alimentaria, por lo que representa un riesgo significativo para la salud humana y la fauna, incluso en concentraciones bajas (EPA, 2025).

2.1.5. Compuestos químicos sintéticos

Esta categoría incluye diversas sustancias producidas por actividades humanas que pueden ingresar en las aguas residuales y representar riesgos ambientales y sanitarios. Entre los compuestos más relevantes se encuentran:

a) Productos farmacéuticos

Incluyen analgésicos, antibióticos, antiinflamatorios, hormonas y otros medicamentos que, tras su consumo, son excretados parcialmente y llegan a las aguas residuales. Su presencia es motivo de preocupación debido a su persistencia, su potencial para inducir resistencia antimicrobiana y sus efectos en organismos acuáticos (Khalid & Abdollahi, 2021).

b) Productos de cuidado personal

Comprenden fragancias, filtros solares, repelentes, agentes humectantes y compuestos presentes en cosméticos y productos de higiene. Muchos de estos no son completamente removidos en los tratamientos convencionales y pueden alterar funciones biológicas en organismos acuáticos, especialmente sistemas hormonales (Khalid & Abdollahi, 2021).

c) Pesticidas y herbicidas

Son sustancias químicas utilizadas en agricultura y control de plagas urbanas. Llegan a los cuerpos de agua mediante escorrentía, drenaje agrícola o descargas directas. Pueden causar toxicidad aguda y crónica en organismos acuáticos, afectar procesos reproductivos y alterar la biodiversidad de los ecosistemas (Mateo-Sagasta, 2017).

2.1.6. Microplásticos

Los microplásticos son partículas plásticas menores de 5 mm que se han convertido en un contaminante prioritario debido a su alta persistencia y capacidad de

dispersión. Proviene de la degradación de plásticos mayores, fibras sintéticas, productos abrasivos y cosméticos.

Su peligrosidad se debe a que:

- Pueden ser ingeridos por peces, moluscos, crustáceos y zooplancton.
- Tienen capacidad de adsorber metales pesados y otros contaminantes.
- Pueden transportar patógenos.
- Ingresan en la cadena alimentaria y pueden llegar al consumo humano.

Estudios recientes han reportado la presencia de microplásticos en agua potable, sal marina e incluso en tejidos humanos, generando una creciente preocupación por sus posibles efectos en la salud y el ambiente (Leslie et al., 2022; OMS, 2019; Weis & Alava, 2023).

Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes incluyen sustancias químicas sintéticas o naturales y microorganismos que no suelen monitorearse de forma rutinaria, pero que pueden encontrarse en aguas residuales y causar efectos adversos.

Entre los principales se encuentran:

- Productos farmacéuticos.
- Hormonas y esteroides.
- Productos de cuidado personal.
- Agentes tensioactivos.
- Retardantes de llama.
- Compuestos perfluorados (PFAS).

Estos contaminantes presentan desafíos significativos debido a:

- Su persistencia química.
- Su baja biodegradabilidad.
- Su detección en concentraciones traza pero con efectos biológicos relevantes.
- La dificultad de removerlos completamente con tratamientos convencionales (EPA, 2025).

2.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y SU IMPACTO AMBIENTAL

La contaminación ambiental constituye una de las principales amenazas para los ecosistemas y la salud humana en el siglo XXI. El crecimiento poblacional, la industrialización y la expansión de actividades productivas han incrementado de forma significativa la generación de residuos, emisiones tóxicas y alteraciones ecológicas. Comprender las fuentes de contaminación es esencial para diseñar estrategias de mitigación efectivas que minimicen su impacto en los cuerpos de agua y en el ambiente en general.

A continuación, se describen las principales fuentes de contaminación y sus efectos ambientales más relevantes.

2.2.1. Contaminación industrial y minera

Las actividades industriales y mineras son responsables de una parte considerable de la contaminación del aire, el agua y el suelo. La industria libera compuestos químicos, metales pesados y residuos peligrosos que deterioran los ecosistemas y pueden persistir durante décadas. Entre los impactos más comunes se encuentran:

- Emisiones gaseosas que contribuyen a la degradación atmosférica.
- Descargas líquidas que contaminan ríos, lagos y acuíferos.
- Generación de residuos tóxicos que afectan la calidad del suelo.

En el sector minero, los drenajes ácidos de mina, los relaves y la liberación de metales pesados en cuerpos de agua generan afectaciones graves a la biodiversidad y a las comunidades cercanas (Sánchez-Espínola et al., 2023).

El caso de la Amazonía constituye un ejemplo crítico. La minería aurífera ilegal, que emplea mercurio para la extracción de oro, ha provocado altos niveles de contaminación en ríos y fauna acuática. Este impacto representa un riesgo directo para las comunidades indígenas que dependen de los recursos acuáticos como fuente de alimentación y subsistencia (Rodríguez & Paredes, 2021). Así mismo, la deforestación asociada a estas actividades intensifica la pérdida de biodiversidad y contribuye al cambio climático.

2.2.2. Contaminación por actividades agropecuarias

El sector agropecuario es otra fuente importante de contaminación ambiental. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, junto con pesticidas y herbicidas, genera la eutrofización de cuerpos de agua. Este fenómeno produce proliferación descontrolada de algas, disminución del oxígeno disuelto y pérdida de biodiversidad acuática (González-Peña et al., 2024).

Además, la ganadería intensiva tiene impactos significativos como:

- La emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero.
- La deforestación para la expansión de pastizales.
- La degradación del suelo por sobrepastoreo.
- El aumento de la erosión y la desertificación.

Estos efectos comprometen la estabilidad de los ecosistemas y reducen la capacidad natural del ambiente para capturar carbono (Martínez et al., 2022).

2.2.3. Contaminación por residuos plásticos y microplásticos

Los residuos plásticos están generando una crisis ambiental creciente a escala global. Millones de toneladas terminan cada año en los océanos y ecosistemas terrestres, afectando a múltiples especies. Los microplásticos, fragmentos menores de 5 mm, se originan tanto por la degradación de plásticos mayores como por productos de uso directo (microesferas cosméticas, fibras sintéticas, pellets industriales).

Estos contaminantes son muy peligrosos debido a que:

- Persisten en el ambiente durante largos periodos.
- Pueden ser ingeridos por peces, aves, moluscos y otros organismos.
- Se incorporan a la cadena alimentaria.
- Tienen potencial para llegar al consumo humano.

Se han registrado efectos negativos en especies acuáticas, incluyendo alteraciones en la fisiología, el comportamiento, el crecimiento y la reproducción (De la Torre et al., 2021). Además, los microplásticos actúan como vectores de contaminantes químicos, adsorbiendo pesticidas, metales pesados y compuestos persistentes, lo que incrementa la toxicidad en los ecosistemas afectados (Fernández et al., 2023).

2.2.4. Contaminación atmosférica y cambio climático

La quema de combustibles fósiles, principalmente en el transporte, la industria y la generación de energía, es la principal fuente de contaminación atmosférica. Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2) contribuyen al cambio climático, la lluvia ácida y la formación de *smog* fotoquímico. Estos contaminantes afectan directamente la salud humana, al incrementar la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otras patologías asociadas a la mala calidad del aire (López & Ramírez, 2022).

El aumento de los gases de efecto invernadero ha acelerado el calentamiento global, fenómeno que se manifiesta en temperaturas récord y eventos climáticos extremos, como huracanes más intensos, inundaciones severas y sequías prolongadas. Estas alteraciones ponen en riesgo la seguridad alimentaria, la disponibilidad de agua y la estabilidad de los ecosistemas, lo cual afecta especialmente a comunidades vulnerables (IPCC, 2023).

2.2.5. Contaminación por residuos sólidos urbanos

La generación creciente de residuos sólidos urbanos constituye otra fuente significativa de contaminación ambiental. En muchas regiones, especialmente en países en desarrollo, los sistemas de recolección, reciclaje y disposición final son insuficientes, y así se produce una acumulación de desechos en vertederos a cielo abierto.

Estos lugares generan

- Lixiviados tóxicos, que pueden infiltrarse en el suelo y contaminar fuentes de agua superficial y subterránea.
- Emisión de gases de efecto invernadero, principalmente metano (CH_4), producido por la descomposición anaerobia de residuos orgánicos.
- Proliferación de vectores que afectan la salud pública.

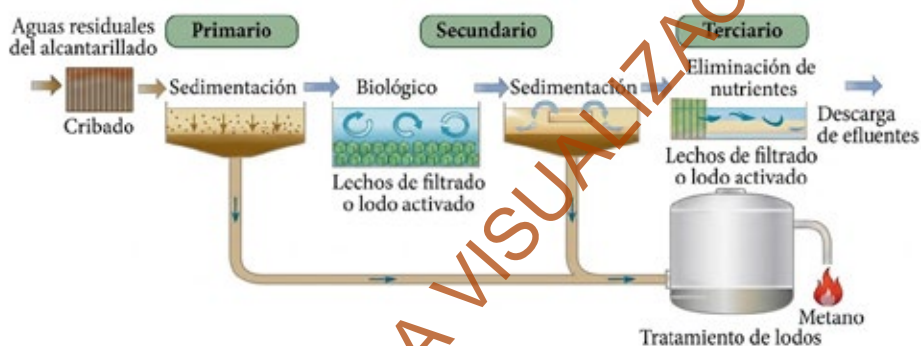
La mala gestión de residuos no solo degrada el ambiente local, sino que también contribuye al calentamiento global y a la pérdida de calidad del suelo (Pacheco et al., 2024).

2.3. MÉTODOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales han sido fundamentales para mitigar los efectos adversos de los contaminantes en cuerpos de agua receptores y permitir la reutilización del recurso. Estos métodos combinan procesos físicos, químicos y biológicos para mejorar la eficiencia de eliminación de contaminantes.

FIGURA 2.

Tratamientos convencionales de aguas residuales



Adaptado de The Open University (s.f.).

2.3.1. Tratamiento primario

El tratamiento primario constituye la primera fase en la depuración de aguas residuales y se orienta a la eliminación de sólidos suspendidos, materiales flotantes y partículas sedimentables mediante procesos físicos. Esta etapa es fundamental para disminuir la carga contaminante inicial y aumentar la eficiencia de las fases posteriores del tratamiento.

Los principales procesos que conforman el tratamiento primario son los siguientes:

a) Rejas y tamices

Se utilizan para retener materiales de gran tamaño como plásticos, ramas, trapos y otros residuos sólidos. Su función es prevenir obstrucciones en las unidades de tratamiento posteriores y proteger equipos electromecánicos.

b) Desarenadores

Son estructuras diseñadas para remover partículas pesadas como arena, grava y otros sólidos inorgánicos mediante sedimentación. Su correcta operación evita el desgaste de bombas, tuberías y equipos, y contribuye a reducir la acumulación de sólidos en los decantadores.

c) Decantadores primarios

Permiten la sedimentación de partículas finas y sólidos suspendidos más pequeños, con lo que se logra una reducción aproximada del 50-60 % de la carga de sólidos presentes en el agua residual (Gómez et al., 2023). Durante este proceso también se remueve parte de la materia orgánica asociada a estos sólidos.

El adecuado funcionamiento del tratamiento primario es esencial para prevenir sobrecargas hidráulicas y mecánicas en las unidades posteriores. Estudios recientes indican que la optimización de la sedimentación primaria puede disminuir hasta en un 30 % la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y en un 40 % la demanda química de oxígeno (DQO), que mejoran significativamente la calidad del efluente previo al tratamiento secundario (López & Martínez, 2024).

2.3.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se sustenta en procesos biológicos orientados a la eliminación de la materia orgánica disuelta y parte de los nutrientes presentes en las aguas residuales. Esta etapa es clave para reducir la contaminación biodegradable antes del tratamiento avanzado. Los sistemas más utilizados son los siguientes:

a) Lodos activados

Consiste en la utilización de microorganismos aeróbicos que degradan la materia orgánica en presencia de oxígeno. Es uno de los métodos más empleados en plantas de tratamiento, y puede alcanzar eficiencias de eliminación de DBO entre el 85 % y el 95 % (Gómez et al., 2023).

b) Filtros percoladores

Estos sistemas emplean un medio filtrante sobre el cual se desarrolla una biopeícula microbiana encargada de descomponer la materia orgánica conforme el

agua percola. Han demostrado alta efectividad en la eliminación de compuestos nitrogenados, especialmente en comunidades con cargas hidráulicas moderadas (Fernández & Ruiz, 2022).

c) Lagunaje o estanques de estabilización

Son sistemas que utilizan la acción combinada de bacterias y algas para degradar la materia orgánica y reducir concentraciones de nutrientes. Debido a su bajo costo y mínima necesidad de mantenimiento, se recomiendan ampliamente para zonas rurales o regiones con disponibilidad de espacio.

d) Biorreactores de membrana (MBR)

En los últimos años, el tratamiento secundario ha incorporado tecnologías avanzadas como los biorreactores de membrana, que combinan lodos activados con filtración mediante membranas. Esto permite una alta calidad del efluente y una remoción más eficiente de contaminantes emergentes como fármacos y productos de cuidado personal (Pérez et al., 2024).

2.3.3. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario, también denominado tratamiento avanzado, se orienta a la eliminación de contaminantes específicos que no han sido removidos en las etapas primaria y secundaria. Su aplicación permite alcanzar estándares de calidad más exigentes y facilitar la reutilización del agua tratada en diferentes actividades. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las siguientes:

a) Filtración con membranas

Incluye procesos como la ultrafiltración, la nanofiltración y, en sistemas más sofisticados, la ósmosis inversa. Estas membranas permiten retener virus, bacterias, sólidos coloidales y diversas moléculas orgánicas, lo que permite lograr altos niveles de pureza en el efluente.

b) Adsorción con carbón activado

Es una técnica empleada para remover compuestos orgánicos persistentes, colorantes, pesticidas y otros contaminantes difíciles de degradar. El carbón activado presenta una elevada capacidad de adsorción, lo cual mejora significativamente la calidad del agua tratada (López & Martínez, 2024).

c) Desinfección

Consiste en la aplicación de agentes químicos o físicos para la eliminación de microorganismos patógenos. Los métodos más utilizados incluyen cloración, ozonización y radiación ultravioleta (UV). Este proceso es fundamental para garantizar la seguridad del agua destinada a reutilización o descarga.

d) Tecnologías combinadas

Los avances recientes en tratamiento terciario han permitido incorporar sistemas híbridos que combinan membranas con procesos de adsorción o desinfección. Un estudio reciente indica que la integración de ósmosis inversa con adsorción en carbón activado puede reducir contaminantes emergentes en hasta un 99 % (Pérez et al., 2024).

El desarrollo de estos métodos avanzados ha permitido obtener efluentes de alta calidad, aptos para aplicaciones agrícolas, industriales e incluso para la recarga de acuíferos, contribuyendo así a una gestión más sostenible del recurso hídrico.

2.3.4. Tendencias y avances en el tratamiento de aguas residuales

El aumento de la contaminación y la creciente escasez de recursos hídricos han impulsado el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales. En los últimos años, la investigación científica ha evolucionado hacia sistemas que no solo remueven contaminantes, sino que también permiten recuperar recursos y reducir el impacto ambiental. Entre las tendencias más relevantes destacan las siguientes:

a) Sistemas de tratamiento descentralizados

Estos sistemas permiten tratar las aguas residuales en su lugar de origen, de modo que se evita la necesidad de infraestructura de transporte y se reducen costos operativos. Son particularmente útiles en comunidades rurales, asentamientos dispersos o zonas con limitaciones de infraestructura. Además, fomentan la reutilización local del agua tratada, mejorando la resiliencia hídrica.

b) Procesos de bioelectroquímica

Incluyen tecnologías como las celdas de combustible microbianas, que utilizan microorganismos capaces de degradar materia orgánica mientras generan pequeñas

cantidades de electricidad. Estos sistemas representan una alternativa prometedora para producir energía a partir de aguas residuales y, al mismo tiempo, lograr la remoción de contaminantes (Fernández & Ruiz, 2022).

c) Integración de biotecnología y métodos avanzados

La tendencia actual apunta hacia la integración de procesos biológicos con tecnologías avanzadas, como membranas, materiales adsorbentes y sistemas electroquímicos. Esta combinación permite mejorar la eficiencia en la eliminación de contaminantes emergentes, reducir el consumo energético y avanzar hacia modelos de tratamiento más sostenibles.

2.4. LIMITACIONES DE LOS TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS

Los tratamientos físico-químicos han sido ampliamente utilizados debido a su rapidez y efectividad en la eliminación de ciertos tipos de contaminantes. No obstante, presentan limitaciones que afectan su sostenibilidad, eficiencia a largo plazo y aplicabilidad en contextos con recursos limitados. Entre los principales inconvenientes se encuentran la generación de residuos secundarios, los altos costos operativos y la limitada capacidad para remover contaminantes emergentes.

a) Generación de residuos secundarios

Uno de los problemas más relevantes de estos procesos es la producción de lodos residuales que requieren una gestión adecuada para evitar impactos ambientales. Los lodos generados en etapas como la coagulación-floculación pueden contener altas concentraciones de metales pesados y compuestos tóxicos, lo que complica significativamente su disposición final (Fytli & Zabaniotou, 2008). Si estos residuos no son gestionados correctamente, pueden provocar la contaminación del suelo y de cuerpos de agua cercanos, agravando los problemas ambientales existentes (Kacprzyk et al., 2017).

b) Altos costos operativos y de mantenimiento

El uso de reactivos químicos, así como la operación de sistemas avanzados como oxidación química o adsorción, pueden elevar de manera considerable los costos del tratamiento. El empleo de carbón activado, por ejemplo, puede representar hasta el 40 % del costo total del proceso, debido al reemplazo periódico del material adsorbente. Además, muchos de estos sistemas requieren mantenimiento

continuo, equipos especializados y personal capacitado, lo que dificulta su implementación en regiones con infraestructura limitada o presupuestos reducidos (López et al., 2024).

c) Ineficiencia frente a contaminantes emergentes

Aunque los tratamientos físico-químicos son eficaces para remover sólidos, materia orgánica convencional y ciertos compuestos inorgánicos, su capacidad para eliminar contaminantes emergentes como fármacos, hormonas, microplásticos y productos de cuidado personal es limitada. Estas sustancias, al ser altamente persistentes y de baja concentración, requieren tecnologías más avanzadas o complementarias para su remoción, lo que incrementa la complejidad y el costo de los sistemas.

d) Alto consumo energético

Algunas tecnologías físico-químicas requieren un uso elevado de energía para su funcionamiento. Procesos como la electrocoagulación, la electrooxidación y ciertas técnicas de oxidación avanzada dependen de un aporte considerable de electricidad, lo cual incrementa los costos operativos y la huella de carbono del tratamiento (Panizza & Cerisola, 2009; Martínez-Huitle & Brillas, 2009).

Para reducir este consumo, se han estudiado estrategias que combinan tratamientos físico-químicos con procesos biológicos, lo que permite disminuir la carga contaminante inicial y optimizar el uso de energía sin comprometer la eficiencia del sistema (Ferrera et al., 2024).

e) Impacto ambiental de los subproductos generados

Algunos métodos físico-químicos, en especial los utilizados para desinfección, pueden generar subproductos tóxicos. Los procesos de cloración y ozonización han mostrado la formación de compuestos como trihalometanos y bromatos, asociados con riesgos potenciales para la salud humana y la calidad del agua (Mendoza et al., 2021).

Para mitigar estos efectos, se ha propuesto la integración de tecnologías complementarias como la fotocatalisis, la oxidación avanzada controlada o la filtración con membranas, que permiten reducir la formación de compuestos no deseados y mejorar la seguridad del agua tratada.



CAPÍTULO 3

BIOTECNOLOGÍA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales representa un desafío creciente a nivel global debido al aumento de contaminantes provenientes de actividades domésticas, industriales y agrícolas. En este contexto, la biotecnología ha surgido como una alternativa innovadora y sostenible, al aprovechar sistemas biológicos capaces de eliminar contaminantes y recuperar recursos valiosos presentes en el agua residual. La utilización de microorganismos, enzimas y procesos biológicos avanzados permite depurar aguas contaminadas con materia orgánica, metales pesados y nutrientes en exceso, de modo que se reduce el impacto ambiental y los costos operativos en comparación con los métodos físico-químicos tradicionales (Rodríguez et al., 2023).

Durante la última década, los avances en ingeniería biotecnológica han impulsado el desarrollo de tecnologías como la biofiltración, la fitorremediación, el uso de microalgas, los sistemas basados en biopelículas y los biorreactores de membrana. Estos enfoques han demostrado elevadas eficiencias en la remoción de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y contaminantes emergentes, al tiempo que permiten la recuperación de productos de valor agregado como biogás, biofertilizantes y biomateriales (Li et al., 2022). La integración de estas tecnologías contribuye no solo a mejorar la calidad del agua tratada,

sino también a avanzar hacia modelos de economía circular en el manejo de aguas residuales.

Este capítulo aborda los principios fundamentales de la biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales. En esa línea, destaca sus ventajas frente a los sistemas convencionales y analiza los factores que influyen en la eficiencia de los procesos. Así mismo, se presentan estudios recientes que evidencian el potencial de estas tecnologías para fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico y reducir la huella ambiental asociada al tratamiento del agua.

FIGURA 3.

Tecnologías aplicadas en la biotecnología del agua: biorremediación, fitorremediación y biofiltración



Adaptación propia a partir de una infografía sobre procesos biotecnológicos ambientales.

3.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOTECNOLOGÍA APLICADA AL AGUA

La biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales emplea sistemas biológicos, como microorganismos, enzimas y plantas, para eliminar o transformar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Este enfoque constituye una alternativa sostenible frente a los métodos convencionales, ya que reduce costos operativos, genera menos residuos secundarios y puede recuperar recursos valiosos del agua tratada (Singh et al., 2020).

Los principales mecanismos biotecnológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales incluyen los siguientes:

a) Biorremediación

La biorremediación consiste en la degradación o transformación de contaminantes mediante microorganismos. Este proceso puede llevarse a cabo de dos formas:

- **Biorremediación *in situ*:** se realiza directamente en el sitio contaminado, sin necesidad de transportar el agua residual.
- **Biorremediación *ex situ*:** el agua es extraída y tratada en un entorno controlado (Kumar & Verma, 2021).

Diversas especies bacterianas, como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Rhodococcus*, han sido empleadas para la degradación de hidrocarburos, metales pesados y contaminantes emergentes, lo que demuestra una notable capacidad de adaptación y eficiencia en ambientes contaminados (Zhang et al., 2023).

b) Biofiltración

La biofiltración utiliza comunidades microbianas adheridas a un medio sólido, como arena, grava o materiales sintéticos, donde los microorganismos capturan y degradan la materia orgánica y nutrientes presentes en el agua. Estos sistemas han mostrado alta eficiencia en la eliminación de nitrógeno, fósforo y materia orgánica tanto en efluentes urbanos como industriales, siendo una tecnología de bajo mantenimiento y alta estabilidad operativa (Li et al., 2022).

c) Tratamiento con microalgas

Las microalgas pueden absorber nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos mientras producen biomasa aprovechable para la generación de biocombustibles, biofertilizantes u otros bioproductos. Estudios recientes demuestran que especies como *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* pueden reducir la demanda química de oxígeno (DQO) hasta en un 80 % y eliminar nitratos en un 90 %, lo que las posiciona como una herramienta biotecnológica de gran potencial (García et al., 2024).

d) Biorreactores de membrana (MBR)

Los MBR combinan procesos biológicos tradicionales con membranas de ultrafiltración o microfiltración, que permiten separar eficientemente sólidos en suspensión y microorganismos patógenos. Su aplicación en aguas residuales urbanas e industriales ha mostrado tasas de eliminación superiores al 95 % para materia orgánica y contaminantes persistentes, lo que los convierte en una alternativa avanzada de gran eficiencia (Rodríguez & Torres, 2023).

e) Fitorremediación

La fitorremediación emplea plantas acuáticas para absorber, transformar o inmovilizar contaminantes presentes en el agua. Especies como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor* (lenteja de agua) han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para remover metales pesados y compuestos nitrogenados. Se ha reportado que estos sistemas pueden eliminar hasta un 85 % de plomo y cadmio en aguas contaminadas (Hernández et al., 2021).

3.2. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS SOBRE LOS TRADICIONALES

Los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para ofrecer soluciones eficientes y sostenibles frente a los métodos físico-químicos convencionales. Su funcionamiento se basa en procesos naturales de degradación, transformación o captura de contaminantes, lo que reduce los impactos ambientales y mejora la calidad del effluente tratado. A continuación, se presentan las principales ventajas de estos sistemas.

a) Mayor sostenibilidad ambiental

Los tratamientos biológicos requieren menos productos químicos agresivos y generan cantidades reducidas de residuos tóxicos. Esto disminuye los riesgos asociados a la formación de subproductos perjudiciales, comunes en procesos tradicionales como la coagulación-floculación o la cloración (Liu et al., 2021). Además, la depuración natural que ofrecen los sistemas biológicos favorece la recuperación de los ecosistemas acuáticos, al reducir la carga contaminante vertida a los cuerpos receptores y evitar el deterioro de la biodiversidad.

b) Eficiencia en la eliminación de contaminantes

Los microorganismos utilizados en procesos biológicos poseen la capacidad de degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos y, en ciertos casos, metales pesados. A diferencia de los tratamientos físico-químicos, que suelen presentar limitaciones en la eliminación de contaminantes emergentes como fármacos, compuestos hormonales, pesticidas y microplásticos, los sistemas biológicos han demostrado una alta efectividad.

Estudios recientes indican que bacterias como *Pseudomonas putida* y *Bacillus subtilis* pueden eliminar hasta el 95 % de fármacos presentes en aguas residuales hospitalarias, lo cual prueba que muestran un desempeño superior al de los procesos tradicionales (Wang et al., 2023).

c) Tecnologías biológicas aplicadas en la remediación de microplásticos en aguas residuales

Según Talukdar et al. (2024), las tecnologías biológicas representan una de las líneas más prometedoras para remediar microplásticos en aguas residuales, debido a que aprovechan procesos naturales de captura, adsorción y, en ciertos casos, degradación parcial de estos polímeros.

FIGURA 4.

Diversas fuentes de microplásticos en aguas residuales, como fibras textiles, productos de cuidado personal, plásticos industriales y agrícolas, junto con la degradación de plásticos mayores y el desgaste de neumáticos



Adaptado de Talukdar et al. (2024).

Entre las principales alternativas descritas se encuentran:

i. Colonización por microalgas

Las microalgas contribuyen a la fijación de nutrientes y pueden atrapar microplásticos en su biomasa. A través de la secreción de sustancias extracelulares poliméricas (EPS), facilitan la formación de agregados de mayor tamaño que sedimentan con mayor facilidad. Este mecanismo mejora la eficiencia de las etapas de separación física posteriores al tratamiento.

ii. Moléculas bioinspiradas

Investigaciones recientes destacan el potencial de usar compuestos derivados de mecanismos biológicos, como biofloculantes naturales, capaces de promover la unión y aglomeración de partículas de microplásticos dispersas en el agua. Estos compuestos aumentan la eficiencia de la clarificación y reducen la dependencia de químicos sintéticos, con lo que favorecen un enfoque más sostenible.

iii. Plantas acuáticas y organismos marinos

El uso de macrófitas y otros organismos acuáticos permite la retención de microplásticos en sus raíces o estructuras corporales, actuando como filtros biológicos. Este tipo de sistemas reproduce procesos ecológicos propios de ambientes acuáticos y puede integrarse en humedales construidos, combinando retención física con actividad microbiana en la rizosfera.

iv. Sistemas de lodos activados

En el tratamiento secundario, los consorcios microbianos presentes en los lodos forman flóculos que adsorben y retienen microplásticos suspendidos. Este mecanismo convierte a los lodos en una barrera biológica eficaz. Sin embargo, se requiere estudiar el destino final de los microplásticos capturados en la fase sólida durante el manejo y disposición de los lodos.

v. Biofiltros

Los biofiltros emplean soportes sólidos donde se desarrollan *biofilms* microbianos capaces de inmovilizar microplásticos. Además, algunos microorganismos dentro del *biofilm* pueden contribuir a la fragmentación o transformación parcial de las partículas. Esta estrategia se considera complementaria y potencialmente integrable en las etapas terciarias del tratamiento.

En conjunto, estas tecnologías biológicas no solo complementan los métodos físico-químicos tradicionales, sino que, además, responden a la necesidad de implementar procesos más sostenibles y respetuosos con el ambiente. No obstante, Talukdar et al. (2024) señalan que aún es necesario mejorar su eficiencia, escalabilidad y manejo de residuos secundarios para su aplicación robusta en plantas de tratamiento a gran escala.

d) Menor consumo energético y costos operativos

Los procesos biológicos, como los sistemas de lodos activados o los reactores anaerobios, requieren menor consumo energético que los métodos físico-químicos convencionales. Se ha reportado que los biorreactores anaerobios pueden reducir hasta en un 40 % el consumo energético en comparación con los sistemas de aireación mecánica utilizados en plantas de tratamiento tradicionales (Gómez et al., 2023).

Además, la digestión anaerobia permite aprovechar la energía contenida en la materia orgánica del agua residual para producir biogás, una fuente de energía renovable capaz de abastecer parcialmente las necesidades del propio sistema (Gómez et al., 2023).

e) Producción de subproductos valiosos y economía circular

Los sistemas biológicos facilitan la recuperación de recursos valiosos, por lo que contribuyen a modelos de economía circular. Entre los subproductos más relevantes destacan:

- Biogás generado en procesos anaerobios.
- Biomasa microalgal utilizada para producir biofertilizantes.
- Agua tratada reutilizable para riego agrícola e industrial.

Zhang et al. (2023) demostraron que la biomasa residual de sistemas basados en microalgas puede transformarse en biofertilizantes ricos en nitrógeno y fósforo, de manera que se reduce la dependencia de insumos químicos y se favorecen prácticas agrícolas sostenibles.

f) Adaptabilidad y escalabilidad

Los sistemas biológicos presentan una alta capacidad de adaptación a distintos tipos de aguas residuales y a diferentes escalas de operación, desde plantas pequeñas descentralizadas hasta grandes estaciones depuradoras urbanas. Esta flexibilidad permite su implementación en comunidades rurales con infraestructura limitada y en industrias que generan efluentes con composición variable (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous et al., 2014).

g) Reducción de subproductos tóxicos

A diferencia de los métodos físico-químicos, que pueden generar residuos secundarios peligrosos como lodos con metales pesados o subproductos cancerígenos derivados de la cloración, los procesos biológicos producen residuos biodegradables que pueden reincorporarse de manera segura en los ciclos naturales (Liu et al., 2021). Esto reduce significativamente los riesgos ambientales asociados a la gestión de residuos.

h) Resistencia y resiliencia ante variaciones de carga contaminante

Los sistemas biológicos muestran una mayor capacidad de adaptación a cambios en la carga orgánica o en la composición del afluente, sin requerir ajustes operativos complejos. Esto es especialmente relevante en el tratamiento de aguas residuales industriales, donde las fluctuaciones de contaminantes pueden ser frecuentes.

Estudios recientes indican que las comunidades microbianas en reactores de lodos activados pueden autorregular su actividad metabólica para mantener una eficiencia de remoción estable, incluso ante variaciones significativas del afluente (Wang et al., 2023; Rodríguez & Torres, 2023).

3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LA BIORREMEDIACIÓN

La eficiencia de la biorremediación en el tratamiento de aguas residuales depende de una interacción compleja entre factores físicos, químicos y biológicos que determinan la actividad y viabilidad de los microorganismos encargados de degradar los contaminantes. Optimizar estas condiciones es fundamental para lograr altas tasas de remoción, estabilidad operativa y sostenibilidad del proceso.

a) Condiciones físico-químicas del medio

El entorno físico y químico en el que actúan los microorganismos es determinante para la eficiencia del tratamiento. Entre los parámetros más importantes se encuentran el pH, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y la salinidad.

- **pH:** la mayoría de las bacterias y hongos empleados en biorremediación presentan una actividad óptima en un rango de pH entre 6 y 8. Valores demasiado bajos o elevados pueden inhibir la actividad enzimática, alterar la integridad celular y disminuir significativamente la eficiencia de degradación (Vidali, 2001).
- **Temperatura:** la biodegradación es más eficiente en rangos moderados, generalmente entre 20 y 35 °C. Temperaturas reducidas ralentizan la actividad metabólica de los microorganismos, mientras que temperaturas superiores pueden desnaturalizar enzimas esenciales y afectar la estabilidad del consorcio microbiano (Zhou et al., 2022).
- **Oxígeno disuelto (OD):** en sistemas aeróbicos, se requiere una concentración mínima de OD de 2 mg/L para garantizar la respiración microbiana y la

degradación eficaz de contaminantes. Por el contrario, en procesos anaerobios, la presencia excesiva de oxígeno puede inhibir la actividad de bacterias metanogénicas, de modo que se reduce la producción de biogás y la eficiencia del tratamiento (Fernández et al., 2023).

- **Salinidad:** en efluentes industriales con elevadas concentraciones de sales, los microorganismos pueden experimentar estrés osmótico, lo que afecta su crecimiento y metabolismo. En estos casos, es necesario emplear microorganismos halotolerantes o adaptar gradualmente los consorcios microbianos al ambiente salino (Madigan et al., 2018).

b) Tipo y concentración de contaminantes

Los contaminantes presentes en el agua residual determinan en gran medida la eficiencia de la biorremediación, ya que su estructura química, toxicidad y concentración influyen directamente en la actividad microbiana. En general, los contaminantes pueden clasificarse en compuestos fácilmente biodegradables, contaminantes recalcitrantes y metales pesados.

- Compuestos fácilmente biodegradables

Incluyen sustancias como carbohidratos, proteínas y lípidos, que son metabolizadas rápidamente por microorganismos heterótrofos. En condiciones óptimas, estos compuestos pueden alcanzar eficiencias de remoción superiores al 90 %, lo que los convierte en los sustratos más adecuados para procesos biológicos convencionales (Metcalf & Eddy, 2014).

- Contaminantes recalcitrantes

Son compuestos cuya estructura química compleja dificulta su degradación. Entre ellos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos, ciertos fármacos, pesticidas y tintes industriales. Para su eliminación se requieren cepas microbianas especializadas o estrategias avanzadas como la bioaumentación y la bioestimulación, que han mostrado mejoras significativas en la degradación de estos contaminantes (Gómez et al., 2023).

- Metales pesados

Los metales como plomo, cadmio, mercurio o arsénico no pueden ser degradados biológicamente. Sin embargo, los microorganismos pueden inmovilizarlos mediante mecanismos como la biosorción, bioacumulación, bioprecipitación o transformación redox. Estos procesos permiten reducir su toxicidad y facilitar su separación del agua residual (Wang et al., 2024).

c) Composición y diversidad microbiana

La diversidad microbiana es un factor determinante en la eficiencia de la biorremediación, ya que un consorcio microbiano diverso puede degradar una gama más amplia de contaminantes que una sola especie. La presencia de distintos grupos funcionales permite la degradación secuencial o sinérgica de compuestos complejos.

- Consorcios microbianos

La combinación de bacterias, hongos y microalgas incrementa la eficiencia de los procesos de degradación, ya que cada grupo aporta rutas metabólicas complementarias. Este enfoque sinérgico permite tratar contaminantes estructuralmente complejos o mixtos, ampliando el rango de biodegradación (Abdel-Raouf et al., 2012).

- Bioaumentación

Consiste en la adición de microorganismos específicos capaces de degradar contaminantes difíciles, como hidrocarburos aromáticos o metales pesados. Este método se utiliza especialmente cuando la microbiota nativa presenta baja capacidad para metabolizar dichos compuestos (Hernández et al., 2021).

- Interacciones microbianas

Las interacciones dentro del consorcio, reguladas en parte por mecanismos de comunicación química como el *quorum sensing*, influyen en la expresión de genes relacionados con la degradación de contaminantes. Estas señales coordinan actividades colectivas como la formación de biopelículas y la producción de enzimas degradativas (Rodríguez & Torres, 2023).

d) Disponibilidad de nutrientes

El metabolismo microbiano requiere de una proporción adecuada de carbono, nitrógeno y fósforo. La relación óptima C:N:P para la degradación eficiente de materia orgánica suele ser de 100:10:1. Desbalances en esta relación pueden limitar el crecimiento microbiano y reducir la eficiencia del proceso.

- Carbono

Constituye la principal fuente de energía para microorganismos heterótrofos y es esencial para mantener la actividad metabólica en la degradación de compuestos orgánicos.

- Nitrógeno y fósforo

Son elementos imprescindibles para la síntesis de proteínas, enzimas y ácidos nucleicos. Su deficiencia limita la capacidad de los microorganismos para reproducirse y mantener rutas metabólicas activas.

- Bioestimulación

Consiste en la adición controlada de nutrientes esenciales para mejorar la degradación en sistemas donde estos elementos son deficientes. La bioestimulación ha demostrado incrementar significativamente la eficiencia de eliminación de contaminantes recalcitrantes y nutrientes inorgánicos (García et al., 2024).

3.3.5. Estrategias de optimización en biorremediación

La optimización de los procesos de biorremediación es fundamental para mejorar la eficiencia y estabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, dado que su desempeño depende directamente de factores biológicos, ambientales y operacionales. En los últimos años se han desarrollado diversas estrategias orientadas a potenciar la capacidad degradativa de los microorganismos, fortalecer la resiliencia de los consorcios microbianos y maximizar la remoción de contaminantes de manera sostenible.

Entre las principales estrategias destacan:

a) Uso de biorreactores avanzados

Tecnologías como los biorreactores de membrana (MBR) combinan procesos biológicos con filtración física mediante membranas, lo que permite una mayor retención de sólidos y microorganismos activos. Este diseño incrementa la estabilidad del sistema ante variaciones de carga y puede alcanzar eficiencias de eliminación superiores al 95 %, incluso frente a contaminantes emergentes (Li et al., 2022).

b) Inmovilización de microorganismos

La fijación de bacterias y consorcios microbianos en soportes sólidos (como perlas de alginato, carbón activado o materiales poliméricos) mejora la estabilidad y resistencia frente a condiciones adversas. Esta estrategia aumenta la densidad celular, promueve la formación de biopelículas especializadas y reduce el tiempo necesario para alcanzar niveles óptimos de tratamiento (Gómez et al., 2023).

c) Aplicación de herramientas ómicas

El uso de técnicas como la metagenómica y la transcriptómica ha permitido avanzar en la caracterización profunda de comunidades microbianas, al identificar genes, rutas metabólicas y microorganismos clave que participan en la degradación de contaminantes. Esto facilita el diseño racional de consorcios microbianos altamente eficientes y adaptados a condiciones específicas del afluente (Zhang et al., 2023).

3.3.6. Estrategias de optimización basadas en metagenómica y metatranscriptómica

a) El papel de la metagenómica en la biorremediación

La metagenómica ha revolucionado el estudio de los sistemas biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales, al permitir caracterizar la diversidad genética completa de una comunidad microbiana, incluyendo especies que no pueden cultivarse en laboratorio. Esta herramienta facilita la identificación de genes relacionados con la degradación de contaminantes y permite comprender las interacciones metabólicas entre los microorganismos que conforman consorcios complejos. Esta información es esencial para seleccionar o diseñar comunidades microbianas más eficientes y mejor adaptadas a las condiciones específicas del agua residual (Zhang et al., 2023).

b) Optimización a partir de la metagenómica

El uso de la metagenómica ha permitido demostrar que parámetros operativos como pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes y concentración de oxígeno no solo influyen en el crecimiento de los microorganismos, sino también en la expresión de genes clave responsables de la biodegradación. Esta comprensión detallada permite ajustar las condiciones del sistema con el objetivo de potenciar rutas metabólicas específicas, acelerar la degradación de contaminantes y mejorar la estabilidad de los consorcios microbianos.

c) Complemento de la metatranscriptómica

Mientras que la metagenómica analiza el potencial genético total de una comunidad, la metatranscriptómica permite identificar cuáles de esos genes se expresan realmente bajo condiciones específicas. Shakya et al. (2019) destacan que esta técnica ofrece una visión dinámica del comportamiento microbiano, y revela cómo los microorganismos responden ante la presencia de contaminantes y qué rutas metabólicas se activan o inhiben en tiempo real. La integración de ambas herramientas proporciona una comprensión más completa de los mecanismos involucrados en la biorremediación.

d) Perspectivas futuras

El uso combinado de metagenómica y metatranscriptómica abre nuevas posibilidades para diseñar estrategias de biorremediación más precisas, sostenibles y adaptadas a la presencia de contaminantes emergentes, con lo que supera las limitaciones de los métodos convencionales. Estas herramientas permiten desarrollar consorcios microbianos optimizados, mejorar la eficiencia de los sistemas biológicos y avanzar hacia tecnologías de tratamiento de próxima generación.

La efectividad de estas estrategias depende de la interacción entre diversos factores, como las condiciones ambientales (pH, temperatura, oxigenación), la naturaleza y concentración de los contaminantes, la diversidad microbiana presente y la disponibilidad de nutrientes esenciales. Por ello, la optimización de los parámetros operativos, junto con la incorporación de tecnologías emergentes, constituye un paso fundamental para fortalecer y modernizar los sistemas de tratamiento biológico.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE UN EFLUENTE INDUSTRIAL CON CONTAMINANTES EMERGENTES

Contexto del problema

Una planta farmacéutica de tamaño medio descarga sus aguas residuales al alcantarillado urbano. El operador municipal ha detectado fallas recurrentes en la eficiencia del tratamiento biológico (variaciones en DBO y presencia de compuestos inhibidores). Se sospecha la presencia de contaminantes emergentes (fármacos) y se decide caracterizar el efluente para seleccionar un esquema de tratamiento compatible.

Datos de entrada

- **Caudal promedio:** 80 m³/día
- **DBO₅:** 450 mg/L
- **pH:** 7,2
- **Ciprofloxacino:** 12 µg/L
- **Diclofenaco:** 8 µg/L
- **Temperatura del efluente:** 20-25 °C (supuesto operativo típico)

Análisis técnico

Carga orgánica diaria (DBO)

La DBO₅ expresa la demanda de oxígeno para degradar la materia orgánica biodegradable. Para estimar la «presión» diaria sobre un sistema biológico:

Conversión: 450 mg/L = 0,45 kg/m³

Carga diaria de DBO = 80 m³/d × 0,45 kg/m³ = 36 kg DBO/d

Esto ubica al efluente como moderadamente cargado (viable para tratamiento biológico), pero aún falta entender si hay inhibición.

Carga diaria de fármacos (masa/día)

Aunque están en µg/L, conviene pasarlo a masa diaria para dimensionar barreras o comparar con umbrales de descarga:

- **Ciprofloxacino:** 12 µg/L = 12 mg/m³
- **Masa/día** = 12 mg/m³ × 80 m³/d = 960 mg/d = 0,96 g/d
- **Diclofenaco:** 8 µg/L = 8 mg/m³
- **Masa/día** = 8 mg/m³ × 80 m³/d = 640 mg/d = 0,64 g/d

En términos de masa total parecen «bajas», pero son altamente activas biológicamente y con potencial de efectos crónicos (resistencia antimicrobiana, alteraciones endocrinas, ecotoxicidad), por lo que la decisión no depende solo de la masa.

Implicancia sobre el proceso biológico municipal

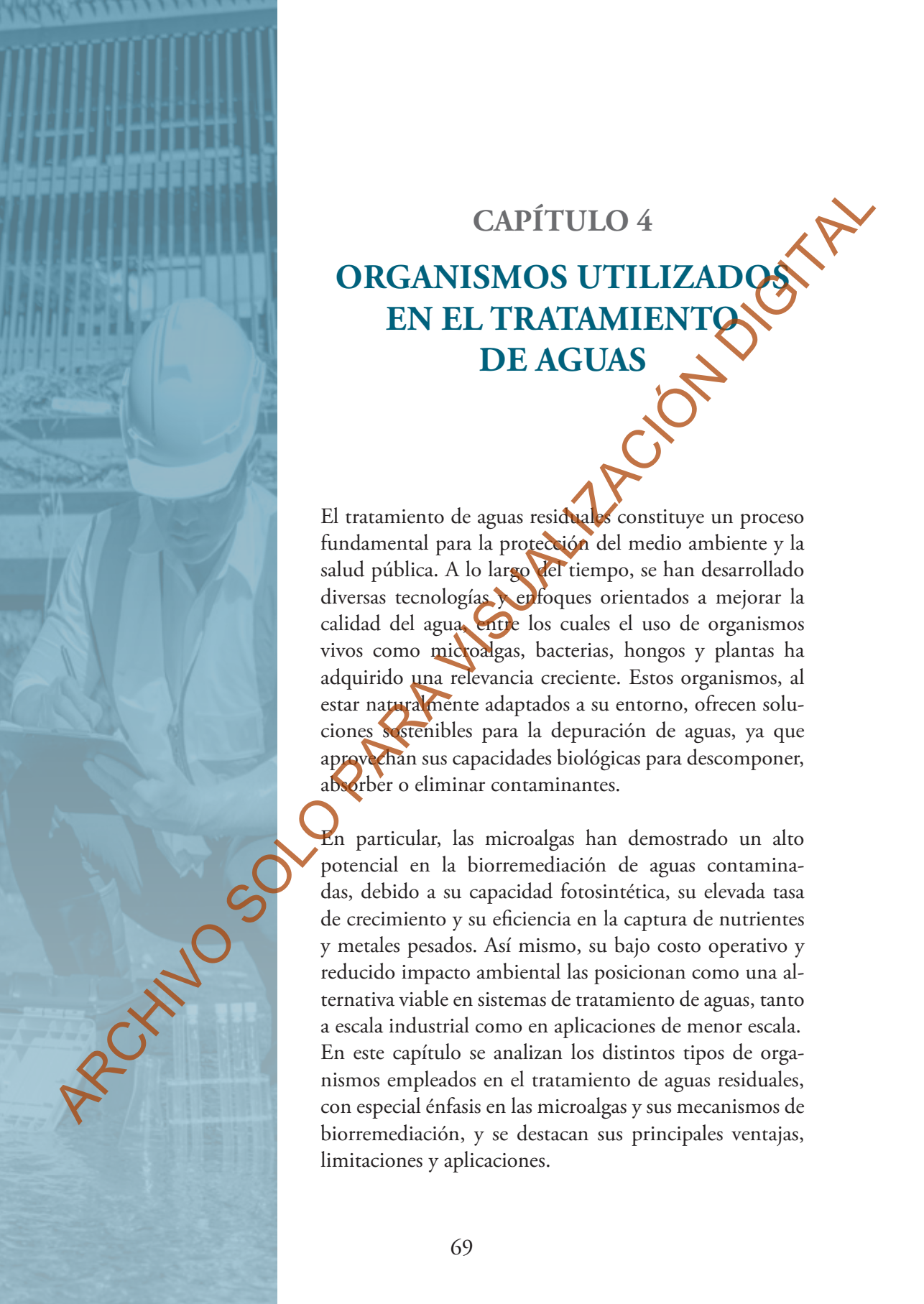
El tratamiento convencional (lodos activados) suele remover DBO con alta eficiencia, pero su desempeño con fármacos es variable: algunos se biodegradan parcialmente, otros se adsorben al lodo, y muchos pasan al efluente.

En materia de selección tecnológica, este perfil sugiere un tratamiento en dos objetivos:

- Reducir carga biodegradable (DBO).
- Incorporar una etapa o mecanismo con capacidad oxidativa/enzimática (hongos, algas, adsorción, oxidación avanzada o combinación).

Conclusión del caso

La caracterización muestra que el efluente es tratable biológicamente (36 kg DBO/d), pero la presencia de fármacos obliga a incorporar una barrera adicional enfocada en contaminantes emergentes. La lección clave del caso es que un efluente «normal» en DBO puede requerir un tratamiento avanzado por su composición cualitativa, no solo cuantitativa.



CAPÍTULO 4

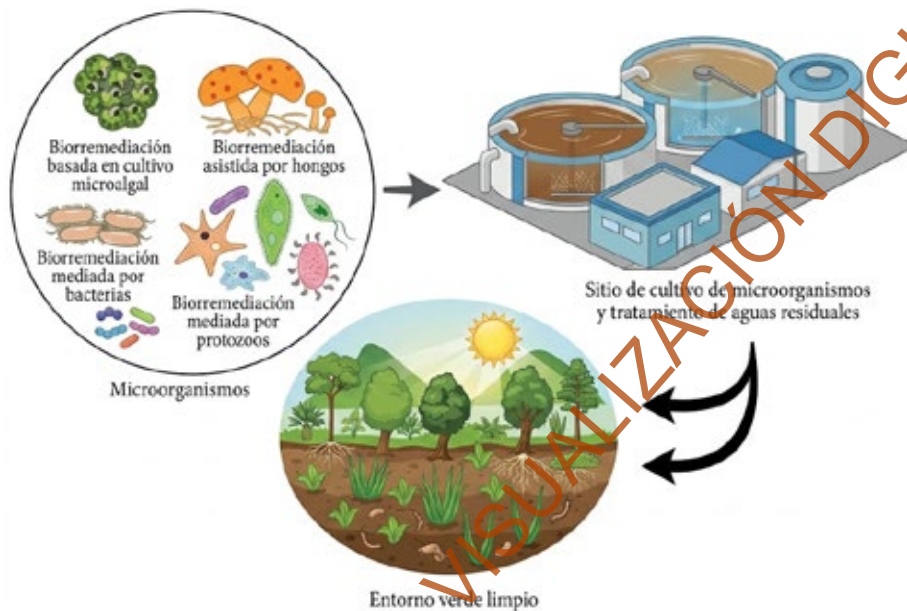
ORGANISMOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

El tratamiento de aguas residuales constituye un proceso fundamental para la protección del medio ambiente y la salud pública. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas tecnologías y enfoques orientados a mejorar la calidad del agua, entre los cuales el uso de organismos vivos como microalgas, bacterias, hongos y plantas ha adquirido una relevancia creciente. Estos organismos, al estar naturalmente adaptados a su entorno, ofrecen soluciones sostenibles para la depuración de aguas, ya que aprovechan sus capacidades biológicas para descomponer, absorber o eliminar contaminantes.

En particular, las microalgas han demostrado un alto potencial en la biorremediación de aguas contaminadas, debido a su capacidad fotosintética, su elevada tasa de crecimiento y su eficiencia en la captura de nutrientes y metales pesados. Así mismo, su bajo costo operativo y reducido impacto ambiental las posicionan como una alternativa viable en sistemas de tratamiento de aguas, tanto a escala industrial como en aplicaciones de menor escala. En este capítulo se analizan los distintos tipos de organismos empleados en el tratamiento de aguas residuales, con especial énfasis en las microalgas y sus mecanismos de biorremediación, y se destacan sus principales ventajas, limitaciones y aplicaciones.

FIGURA 5.

Microorganismos empleados en procesos biotecnológicos para la depuración, recuperación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico



Adaptado de Singh et al. (2022).

4.1. MICROALGAS Y SU PAPEL EN LA BIORREMEDIACIÓN

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que desempeñan un papel relevante en la biorremediación de aguas residuales, debido a su capacidad para eliminar diversos contaminantes y mejorar la calidad del agua. Estos microorganismos pueden absorber nutrientes, metales pesados, materia orgánica y contaminantes emergentes, como fármacos y pesticidas. Por estas características, su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas ha sido ampliamente estudiada e implementada en distintos sectores industriales, destacando por su eficiencia y sostenibilidad ambiental.

4.2. MECANISMOS DE BIORREMEDIACIÓN EN MICROALGAS

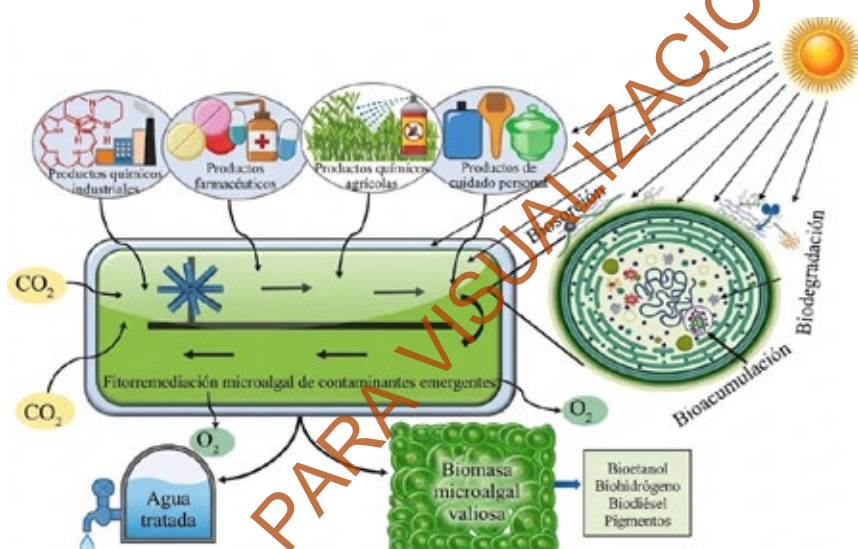
4.2.1. Bioadsorción

La bioadsorción es un mecanismo que se basa en la capacidad de las microalgas para captar y retener contaminantes en su superficie celular sin requerir metabolismo.

activo. En este proceso, sustancias como metales pesados y compuestos orgánicos se adhieren a la biomasa algal mediante interacciones electrostáticas, enlaces iónicos y fuerzas de Van der Waals. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en la remoción de contaminantes como plomo, cadmio y arsénico presentes en efluentes industriales, reportándose eficiencias superiores al 90 % en determinados casos (Xie et al., 2021).

FIGURA 6.

Mecanismos de biorremediación en microalgas



Adaptado de Kumar & Shukla (2023).

4.2.2. Bioacumulación

La bioacumulación es un mecanismo mediante el cual las microalgas absorben contaminantes a través de procesos metabólicos activos y los almacenan en su biomasa. Este proceso resulta particularmente eficaz para la eliminación de metales pesados y nutrientes como nitratos y fosfatos. La captación se produce mediante el transporte activo de iones hacia el interior celular, donde estos pueden ser almacenados en vacuolas o incorporados en diversas estructuras celulares. Estudios han demostrado que *Chlorella sp.* presenta una alta eficiencia en la bioacumulación de nitrógeno y fósforo, en tanto alcanzan tasas de eliminación superiores al 80 % en aguas residuales de origen agrícola (Li et al., 2019).

4.2.3. Biotransformación

La biotransformación consiste en la conversión de contaminantes en compuestos menos tóxicos mediante reacciones bioquímicas que ocurren en el interior celular de las microalgas. Este mecanismo es especialmente relevante en la degradación de contaminantes emergentes, como fármacos y pesticidas, los cuales pueden ser transformados en metabolitos menos persistentes y dañinos a través de procesos enzimáticos. Se ha observado que *Scenedesmus obliquus* es capaz de transformar antibióticos en productos de menor impacto ambiental, con tasas de transformación superiores al 70 % en periodos inferiores a diez días (Wang et al., 2023).

4.2.4. Fitoextracción

La fitoextracción se refiere a la capacidad de las microalgas para absorber metales pesados del medio acuático y almacenarlos en su biomasa. Este mecanismo resulta particularmente eficiente para la eliminación de elementos como mercurio, cromo y cadmio presentes en efluentes industriales. Investigaciones han demostrado que *Spirulina platensis* puede acumular hasta un 95 % de estos metales en su biomasa, lo que la convierte en una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas contaminadas por residuos mineros (De la Vega et al., 2022).

4.2.5. Biodegradación

La biodegradación es el proceso mediante el cual compuestos orgánicos complejos son transformados en sustancias más simples a través de enzimas producidas por las microalgas. Este mecanismo desempeña un papel clave en la reducción de la materia orgánica y de compuestos tóxicos presentes en efluentes industriales y urbanos. Se ha demostrado que *Botryococcus braunii* posee la capacidad de degradar hidrocarburos derivados del petróleo, con lo que se logra una reducción significativa de la carga contaminante en cuerpos de agua afectados por derrames de crudo (Ramírez-Coutiño et al., 2020).

4.3. PRINCIPALES ESPECIES DE MICROALGAS UTILIZADAS EN BIORREMEDIACIÓN

4.3.1. *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris es una de las microalgas más empleadas en procesos de biorremediación de aguas residuales, debido a su elevada capacidad para absorber

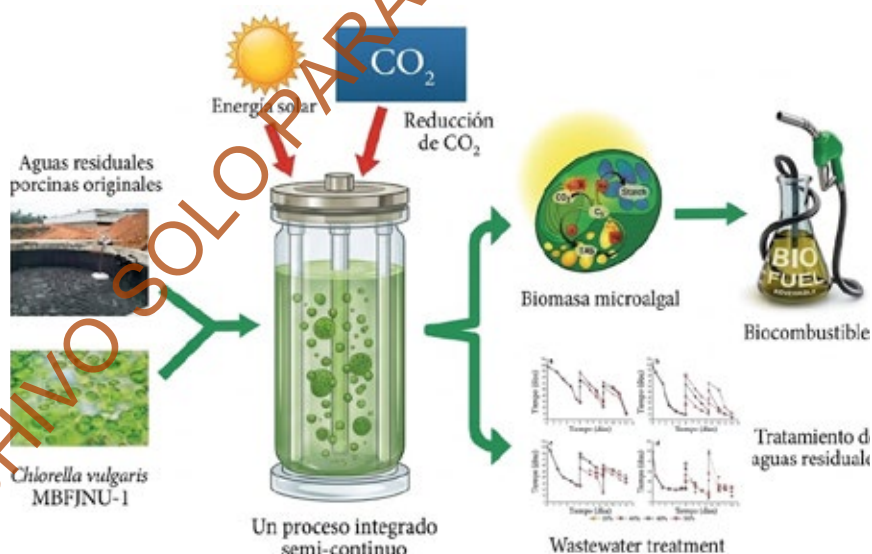
nutrientes como nitrógeno y fósforo. Esta especie utiliza principalmente mecanismos de bioadsorción y bioacumulación para la eliminación de compuestos orgánicos y metales pesados, y ha demostrado además potencial en la degradación de contaminantes emergentes, como fármacos y pesticidas. Estudios recientes han evidenciado que *C. vulgaris* puede reducir hasta un 85 % de nitratos y un 78 % de fósforo en efluentes urbanos (Li et al., 2019).

4.3.2. *Scenedesmus obliquus*

Scenedesmus obliquus es una microalga ampliamente utilizada en la eliminación de nitratos y materia orgánica presentes en efluentes industriales. Esta especie emplea mecanismos de biotransformación y biodegradación para la remoción de colorantes y metales pesados. Investigaciones han demostrado que *S. obliquus* puede remover hasta un 92 % de los colorantes industriales presentes en aguas contaminadas, lo que resalta su potencial en sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales (Ramírez-Coutiño et al., 2020).

FIGURA 7

Cultivo semicontinuo integrado para tratar aguas residuales porcinas



Adaptado de Zheng et al. (2021).

4.3.3. *Spirulina platensis*

Spirulina platensis presenta una notable capacidad de bioadsorción y fitoextracción de metales pesados, como cadmio, plomo y arsénico. Diversos estudios han evidenciado que esta especie puede eliminar hasta un 95 % de metales pesados presentes en aguas contaminadas (De la Vega et al., 2022). Así mismo, su elevada tolerancia a distintas condiciones de salinidad y pH le confiere una alta adaptabilidad a diversos tipos de aguas residuales, lo que amplía su aplicabilidad en sistemas de tratamiento.

4.3.4. *Dunaliella salina*

Dunaliella salina es una microalga halotolerante que emplea mecanismos de bioadsorción y biotransformación para la eliminación de metales pesados y compuestos tóxicos. Investigaciones recientes han demostrado que esta especie puede reducir hasta en un 80 % la concentración de metales como mercurio y cromo en aguas contaminadas, lo que resalta su potencial en ambientes con alta salinidad (Xie et al., 2021).

4.3.5. *Nannochloropsis sp.*

Nannochloropsis sp. es reconocida por su capacidad para eliminar amonio y compuestos orgánicos de aguas contaminadas mediante mecanismos de bioacumulación y biodegradación. Estudios han demostrado que esta especie puede reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) en más del 80 %, de modo que contribuye significativamente a la mejora de la calidad del agua tratada (Wang et al., 2023).

4.3.6. *Botryococcus braunii*

Botryococcus braunii es una microalga con alta capacidad de acumulación de lípidos, que emplea mecanismos de bioadsorción y biodegradación para la eliminación de hidrocarburos presentes en aguas contaminadas con petróleo. Se ha demostrado que esta especie puede reducir de manera significativa la carga contaminante en cuerpos de agua afectados por derrames de crudo, lo que la convierte en una alternativa relevante para la biorremediación de ambientes impactados por actividades petroleras (Li et al., 2019).

4.4. PRODUCCIÓN DE BIOMASA CON VALOR AGREGADO

La producción de biomasa con valor agregado constituye un enfoque que no solo contribuye al tratamiento de aguas residuales, sino que también abre oportunidades para la generación de productos con alto valor comercial. En este contexto, las microalgas representan una fuente prometedora de biomasa debido a su capacidad para sintetizar compuestos de interés económico, como lípidos, proteínas, carbohidratos, pigmentos y antioxidantes. Estos compuestos presentan aplicaciones en diversas industrias, entre ellas la de biocombustibles, cosméticos, nutracéuticos, farmacéuticos y fertilizantes.

Así mismo, el uso de microalgas para la producción de biomasa con valor agregado puede desempeñar un papel clave en el marco de la economía circular, ya que permite el aprovechamiento de recursos naturales y desechos industriales para la obtención de productos de alto valor, minimizando el impacto ambiental.

Las microalgas poseen características que las hacen especialmente adecuadas para la producción de biomasa de alto valor, tales como su rápida tasa de crecimiento, elevada productividad por unidad de área y capacidad para acumular grandes cantidades de compuestos bioactivos. Además, pueden ser cultivadas utilizando efluentes de aguas residuales como fuente de nutrientes, lo que posibilita la biorremediación simultánea del agua y la generación de biomasa para aplicaciones comerciales. A diferencia de otras fuentes tradicionales de biomasa, las microalgas no requieren tierras agrícolas para su cultivo, lo que refuerza su sostenibilidad.

4.4.1. Producción de biocombustibles

La producción de biocombustibles a partir de biomasa algal se basa en el aprovechamiento de microalgas ricas en lípidos como materia prima para la obtención de biodiésel mediante procesos de transesterificación. Diversos estudios han demostrado que especies como *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis sp.* permiten una producción eficiente de este biocombustible renovable, el cual representa una alternativa viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a la mitigación del cambio climático (Li et al., 2019).

4.4.2. Fertilizantes y productos agrícolas

La biomasa microalgal puede emplearse como fertilizante agrícola debido a su alto contenido de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, al actuar como biofertilizante y mejorador de la calidad del suelo. Diversos estudios indican que su aplicación favorece el crecimiento vegetal, reduce la dependencia de fertilizantes químicos convencionales y contribuye a una agricultura más sostenible (Wang et al., 2023).

4.4.3. Cosméticos y productos farmacéuticos

Las microalgas constituyen una fuente relevante de compuestos bioactivos, como carotenoides, antioxidantes, ácidos grasos esenciales y proteínas, ampliamente utilizados en las industrias cosmética y farmacéutica. Investigaciones han demostrado que compuestos como la ficocianina presentan propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, lo que justifica su uso en productos cosméticos, suplementos nutricionales y aplicaciones terapéuticas (Ramírez-Coutiño et al., 2020).

4.4.4. Bioplásticos

La producción de bioplásticos a partir de microalgas se basa en el aprovechamiento de polisacáridos presentes en su biomasa para la elaboración de materiales biodegradables. Estudios recientes señalan que esta alternativa representa una opción sostenible frente a los plásticos derivados del petróleo, con potencial para reducir la acumulación de residuos plásticos y el impacto ambiental asociado (De la Vega et al., 2022).

4.5. MÉTODOS DE CULTIVO

Los métodos de cultivo de microalgas pueden clasificarse principalmente en sistemas abiertos y sistemas cerrados, cada uno con características, ventajas y limitaciones específicas que determinan su aplicación según la escala de producción, el tipo de biomasa requerida y el nivel de control necesario sobre las condiciones ambientales.

4.5.1. Sistemas abiertos de cultivo

Los sistemas abiertos, como los estanques y lagos de cultivo, son ampliamente utilizados debido a su bajo costo de instalación y operación, lo que los hace

adecuados para producciones a gran escala. Sin embargo, presentan limitaciones importantes en el control de las condiciones ambientales, lo que puede afectar la productividad y la estabilidad del cultivo. Además, estos sistemas son vulnerables a la contaminación cruzada y a las fluctuaciones climáticas, factores que pueden impactar negativamente en el crecimiento de las microalgas.

a) Estanques de cultivo (*Pond cultivation*)

Este sistema consiste en estanques de gran tamaño en los que las microalgas crecen en un medio acuoso expuesto a la luz solar directa. Aunque se trata de una opción económicamente viable, la productividad suele ser variable debido a factores ambientales como la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. Los estanques abiertos son más adecuados para la producción masiva de biomasa microalgal, especialmente cuando no se requiere un control estricto de las condiciones de cultivo (Zhang et al., 2023).

- Lagos de cultivo (*Lagoon systems*)

Los lagos de cultivo aprovechan grandes cuerpos de agua para el desarrollo de microalgas; presentan características similares a los estanques abiertos. La falta de control sobre las condiciones de cultivo puede generar fluctuaciones en el crecimiento microalgal, por lo que estos sistemas se emplean principalmente en aplicaciones a gran escala, como la producción de biomasa para biocombustibles o la biorremediación de aguas residuales (Xu et al., 2021).

4.5.2. Sistemas cerrados de cultivo

Los sistemas cerrados, entre los que destacan los fotobiorreactores, implican una mayor inversión inicial, pero permiten un control preciso de las condiciones ambientales, como la iluminación, el pH, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. Estas características favorecen una mayor eficiencia productiva y una biomasa de mayor calidad, siendo especialmente adecuados para aplicaciones de alto valor.

a) Fotobiorreactores horizontales (*Horizontal photobioreactors*)

En estos sistemas, las microalgas se cultivan en tubos o canales dispuestos horizontalmente, lo que maximiza la exposición a la luz y facilita la circulación del medio de cultivo. Son ideales para cultivos de alta densidad y cuando se requiere un control riguroso de las condiciones de crecimiento, aunque su

implementación demanda una inversión significativa y un mantenimiento constante (Wang et al., 2023).

- Fotobiorreactores verticales (*Vertical photobioreactors*)

Los fotobiorreactores verticales utilizan columnas en las que se desarrollan los cultivos microalgales, lo cual permite un uso más eficiente del espacio y de la radiación luminosa. Estos sistemas ofrecen un alto grado de control sobre el medio de cultivo y son adecuados para instalaciones a pequeña y mediana escala, donde la productividad y la calidad de la biomasa son factores prioritarios (López et al., 2022).

- Fotobiorreactores de columna de burbujas (*Bubble column photobioreactors*)

Este tipo de fotobiorreactor consiste en una columna vertical con un medio líquido en el que se cultivan las microalgas, donde se inyecta aire o CO₂ para favorecer la mezcla y mejorar la transferencia de masa. Estos sistemas presentan una alta eficiencia en la producción de biomasa, aunque requieren un control constante de variables como la concentración de CO₂ y la temperatura. Son ampliamente utilizados en aplicaciones comerciales, especialmente en los sectores biotecnológico y farmacéutico (Li et al., 2023).

4.5.3. Fotobiorreactores de película delgada (*Thin-film Photobioreactors*)

Los fotobiorreactores de película delgada se caracterizan por el cultivo de microalgas en una capa delgada de medio líquido en contacto con superficies transparentes, lo que optimiza la captación de luz y la eficiencia fotosintética. Este sistema permite un control preciso de parámetros como la irradiación y la temperatura, y resulta especialmente eficiente para la producción de biomasa en espacios reducidos. Debido a estas características, se emplea principalmente en investigaciones científicas y en la obtención de biomasa de alto valor agregado (Huang et al., 2020).

4.6. MÉTODOS DE COSECHA DE MICROALGAS

La cosecha de microalgas constituye una etapa clave en los sistemas de cultivo, ya que permite la separación de la biomasa microalgal del medio acuoso para su posterior procesamiento y aprovechamiento. La selección del método de cosecha

depende de factores como la densidad del cultivo, el tipo de microalga, la escala de producción y los requisitos de calidad de la biomasa.

4.6.1. Centrifugación

La centrifugación es uno de los métodos más eficaces para la recolección de microalgas, ya que emplea fuerzas centrífugas para separar la biomasa del medio líquido, lo que permite obtener una biomasa altamente concentrada. Este proceso se caracteriza por su rapidez y elevada eficiencia; sin embargo, presenta como principales limitaciones el alto consumo energético y el elevado costo del equipamiento requerido. Por estas razones, la centrifugación se utiliza principalmente en aplicaciones en las que la pureza y la calidad de la biomasa son factores críticos (Xie et al., 2021).

4.6.2. Floculación

La floculación consiste en la adición de agentes coagulantes que promueven la aglomeración de las microalgas en partículas de mayor tamaño, denominadas flóculos, lo que facilita su posterior separación del agua. Este método resulta rentable y eficiente, especialmente en sistemas de cultivo a gran escala. Entre los coagulantes más empleados se encuentran las sales metálicas, como el cloruro de aluminio y el sulfato de hierro. A pesar de su bajo costo y simplicidad operativa, la floculación requiere un manejo adecuado de los productos químicos utilizados para evitar impactos ambientales o en la calidad de la biomasa (Kumar & Kumar, 2022).

4.6.3. Filtración

La filtración es un método que permite separar las microalgas del medio acuoso mediante el uso de membranas con diferentes tamaños de poro. Puede aplicarse tanto en sistemas de filtración directa, en los que el agua atraviesa el filtro reteniendo la biomasa, como en filtración tangencial, en la que el flujo se desvía paralelamente a la superficie de la membrana. Este método es especialmente eficiente en cultivos con densidades moderadas de microalgas; no obstante, su eficiencia puede disminuir a medida que aumenta la concentración de biomasa, debido al ensuciamiento de las membranas (Li et al., 2023).

4.6.4. Flotación por aire disuelto (DAF)

La flotación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés) es un proceso en el que se introduce aire en el medio acuoso para generar microburbujas que se adhieren a las microalgas, con lo que facilitan su ascenso a la superficie y posterior recolección. Este método es particularmente eficaz en cultivos con alta densidad de biomasa y se caracteriza por su bajo costo operativo. En la práctica, la DAF suele emplearse en combinación con otros métodos de cosecha, como la floculación, para mejorar la eficiencia del proceso (Hanotu et al., 2012).

4.7. APLICACIONES EN EL SECUESTRO DE CO₂

El secuestro de dióxido de carbono (CO₂) constituye un proceso fundamental en la mitigación del cambio climático, ya que contribuye a reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. En este contexto, las microalgas han surgido como una de las alternativas más prometedoras para la captura y fijación de CO₂, debido a su elevada eficiencia fotosintética y a su capacidad para transformar el carbono inorgánico en biomasa utilizable. Este proceso no solo favorece la reducción del CO₂ atmosférico, sino que también permite la obtención de biomasa con potencial aplicación en la producción de biocombustibles y otros productos de valor agregado.

4.7.1. Mecanismo de secuestro de CO₂ por microalgas

Las microalgas, al igual que las plantas superiores, realizan la fotosíntesis, proceso mediante el cual capturan CO₂ y lo convierten en compuestos orgánicos utilizando la energía solar. Durante este proceso, el dióxido de carbono se disuelve en el medio acuoso y es absorbido por las microalgas a través de sus membranas celulares, para ser posteriormente fijado en la biomasa en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas. Este mecanismo presenta un elevado potencial para la eliminación de grandes cantidades de CO₂, especialmente cuando las microalgas se cultivan en sistemas cerrados, como los fotobiorreactores, donde la concentración de CO₂ puede controlarse de manera eficiente para maximizar la tasa fotosintética y la productividad del cultivo (Li et al., 2022). Además, la biomasa generada puede destinarse a la producción de biocombustibles, alimentos, piensos y productos farmacéuticos, de modo que se refuerza la sostenibilidad del proceso.

4.7.2. Sistemas de cultivo para el secuestro de CO₂

El secuestro de dióxido de carbono (CO₂) mediante cultivos de microalgas puede realizarse a través de distintos tipos de sistemas de cultivo, que abarcan desde configuraciones abiertas hasta sistemas cerrados. La elección del sistema depende de factores como la escala de producción, el nivel de control requerido y los objetivos específicos del proceso de captura de carbono.

a) Sistemas abiertos (estanques y lagos)

Los sistemas abiertos, como los estanques y lagos de cultivo, se emplean comúnmente para el secuestro de CO₂ debido a su bajo costo de implementación y su idoneidad para producciones a gran escala. No obstante, la limitada capacidad de control sobre variables ambientales, como la temperatura, la irradiación solar y la concentración de nutrientes, puede reducir su eficiencia en la captura de CO₂ en comparación con los sistemas cerrados (Wang et al., 2022).

En estos sistemas, el CO₂ suele suministrarse mediante burbujeo de gas o a partir de fuentes externas, como emisiones industriales, con el fin de incrementar la tasa de fijación de carbono. Sin embargo, la eficiencia del proceso puede verse afectada por factores como la contaminación del cultivo y las fluctuaciones ambientales, que influyen directamente en el crecimiento y la actividad fotosintética de las microalgas (López et al., 2022).

b) Fotobiorreactores cerrados

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados que permiten un control preciso de las condiciones de cultivo, incluyendo la temperatura, la iluminación y la concentración de CO₂, lo que se traduce en una mayor eficiencia del secuestro de carbono. Estos sistemas pueden presentar diferentes configuraciones, como fotobiorreactores horizontales, verticales, de columna de burbujeo y de película delgada, cada una con ventajas específicas en materia de diseño y rendimiento.

En los fotobiorreactores, el CO₂ se suministra de forma continua y se mantiene en concentraciones óptimas para maximizar la fotosíntesis y el crecimiento microalgal. Así mismo, estos sistemas permiten el cultivo a altas densidades celulares, lo que incrementa la cantidad de CO₂ capturado en espacios reducidos. Debido a su mayor eficiencia y control, los fotobiorreactores se utilizan ampliamente en aplicaciones comerciales y de investigación orientadas a la captura de CO₂, la

producción de biocombustibles y la generación de biomasa de alto valor agregado (Zhao et al., 2022).

4.7.3. Ventajas del secuestro de CO₂ con microalgas

El secuestro de CO₂ mediante microalgas presenta múltiples ventajas frente a otras estrategias de mitigación del carbono. En primer lugar, las microalgas exhiben una elevada eficiencia en la captura de CO₂ en comparación con las plantas terrestres, debido a su rápido crecimiento y a su capacidad para adaptarse a condiciones extremas de cultivo. Se ha reportado que determinadas especies pueden fijar más de 1,8 toneladas de CO₂ por cada tonelada de biomasa producida, lo que resalta su alto potencial como sumideros biológicos de carbono (Liu et al., 2023).

Así mismo, este proceso permite la generación de biomasa útil con aplicaciones en diversos sectores, como la producción de biocombustibles, alimentos, productos cosméticos y farmacéuticos. La biomasa microalgal puede emplearse como materia prima para la obtención de biodiésel, metano o bioetanol, y así contribuye de manera directa a la economía circular y a la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Otra ventaja relevante es la reducción de la huella de carbono asociada a diferentes actividades industriales. El cultivo de microalgas para el secuestro de CO₂ puede disminuir significativamente las emisiones netas de sectores como la energía, la biotecnología y la producción de alimentos, al capturar dióxido de carbono tanto de fuentes industriales como de la atmósfera. Finalmente, el secuestro de CO₂ mediante microalgas puede integrarse en procesos industriales existentes, como plantas de generación eléctrica, fábricas o refinerías, con lo cual ofrece una solución eficiente para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito industrial (Zhang et al., 2022).

4.7.4. Desafíos del secuestro de CO₂ con microalgas

A pesar de sus múltiples ventajas, el secuestro de CO₂ mediante microalgas enfrenta diversos desafíos que limitan su implementación a gran escala. Uno de los principales obstáculos es el elevado costo asociado a los sistemas de cultivo cerrados, como los fotobiorreactores, lo que afecta la viabilidad económica de estos procesos. Además, la eficiencia de captura de CO₂ puede verse influenciada por factores como la contaminación del cultivo, las fluctuaciones climáticas y

la necesidad de un suministro constante de nutrientes para mantener un crecimiento óptimo de las microalgas (Singh & Gu, 2010).

En este contexto, la mejora genética y fisiológica de las especies de microalgas, la optimización de los sistemas de cultivo y la integración de estos procesos con otras actividades industriales representan líneas clave de investigación y desarrollo. El avance en estas áreas resulta fundamental para superar las limitaciones técnicas y económicas actuales, y para consolidar el secuestro de CO₂ con microalgas como una estrategia viable y sostenible frente al cambio climático.

4.8. ENFOQUE INTEGRADO PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y LA PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES CON *CHLORELLA VULGARIS*

Este estudio consolida un enfoque integrado basado en la aplicación de *Chlorella vulgaris* para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de recursos, articulando aspectos metodológicos, ambientales, productivos y de sostenibilidad. La investigación demuestra que la biotecnología microalgal permite abordar de manera simultánea la remoción de contaminantes y la generación de biomasa de valor agregado, en coherencia con los principios de economía circular y desarrollo sostenible (Delgado et al., 2025).

4.8.1. Eficiencia del sistema microalgal en la remediación de aguas residuales

La aplicación de *Chlorella vulgaris* evidenció una alta eficiencia en la remoción de nutrientes y contaminantes presentes en aguas residuales. Se observaron reducciones significativas en las concentraciones de nitrógeno total, fósforo total, materia orgánica y sólidos totales disueltos, lo que permitió una mejora sustancial de la calidad del agua tratada.

Estos resultados confirman el potencial de los sistemas microalgales como alternativa sostenible frente a los tratamientos convencionales, con lo que contribuyen a la reducción de la carga contaminante y a la protección de los cuerpos de agua.

4.8.2. Producción y características de la biomasa microalgal

El uso de biorreactores abiertos tipo *raceway ponds* permitió una producción continua y estable de biomasa microalgal, demostrando la viabilidad técnica del sistema tanto en contextos comunitarios como industriales. La biomasa generada presentó un contenido elevado de proteínas y carbohidratos, lo que la hace adecuada para su aprovechamiento en aplicaciones agrícolas y energéticas.

La estabilidad del sistema productivo refuerza el potencial del enfoque integrado para su escalamiento y replicabilidad en diferentes escenarios de gestión hídrica.

4.8.3. Aplicación de la biomasa como biofertilizante

La biomasa obtenida fue aplicada en ensayos de cultivo vegetal, y puso en evidencia mejoras en el crecimiento de las plantas y en la calidad del suelo. Estos resultados demuestran la capacidad de la biomasa microalgal para recuperar nutrientes y cerrar el ciclo de recursos, pues se fortalece la sostenibilidad del sistema propuesto.

El uso de la biomasa como biofertilizante contribuye además a reducir la dependencia de insumos químicos, al favorecer prácticas agrícolas más sostenibles.

4.8.4. Impacto ambiental, económico y contribución al desarrollo sostenible

Desde una perspectiva ambiental, el uso de *Chlorella vulgaris* reduce la dependencia de tratamientos químicos convencionales, pues disminuye la generación de residuos secundarios y su impacto negativo. En términos económicos, la valorización de la biomasa como fertilizante orgánico o insumo para bioenergía aporta beneficios adicionales, de modo que contribuye a la sostenibilidad económica del sistema.

Así mismo, la investigación evidencia una contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima), al consolidar un modelo replicable para la gestión sostenible de los recursos hídricos y agrícolas.

4.8.5. Alcances y proyecciones del enfoque integrado

El enfoque desarrollado permite enfrentar los desafíos asociados a la gestión sostenible del agua y la agricultura, y abre oportunidades para aumentar la

rentabilidad del secuestro de CO_2 mediante el uso de microalgas. Así mismo, sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a la optimización de los sistemas microalgales, su escalamiento y su integración en estrategias de bioeconomía y economía circular.

4.9. CASO APLICADO. SELECCIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO SEGÚN TIPO DE EFLUENTE

Contexto del problema

Un municipio debe escoger alternativas de tratamiento para dos tipos de efluentes: doméstico y agroindustrial. La decisión no solo es técnica; también considera operación, estabilidad ante variaciones y costo energético.

Datos comparativos iniciales

Tipo de efluente	DBO (mg/L)	Tóxicos / Recalcitrantes	Variabilidad
Doméstico	250	Baja	Media
Agroindustrial	1200	Media	Alta

Paso 1: traducir concentración a carga

Asumamos un caudal de evaluación de $100 \text{ m}^3/\text{d}$ para comparar en igualdad:

- **Doméstico:** $250 \text{ mg/L} = 0,25 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 25 \text{ kg DBO/d}$
- **Agroindustrial:** $1200 \text{ mg/L} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 120 \text{ kg DBO/d}$

Paso 2: identificar la «limitante dominante»

- **Doméstico:** limitante = capacidad de operación simple y estable (no tanto toxicidad).
- **Agroindustrial:** limitante = carga orgánica alta + variabilidad (picos de producción).

Paso 3: selección del proceso

- **Doméstico** $\rightarrow$ humedales / lodos activados / biofiltros
Elegir según espacio y operación: humedal si hay terreno; lodos activados si hay energía y personal técnico; biofiltro si se busca simplicidad y menor lodo.

- **Agroindustrial** → UASB + pulido aeróbico

Un reactor anaerobio absorbe la carga (120 kg/d) con bajo consumo energético y produce biogás; el pulido aeróbico controla efluente final.

Conclusión del caso

El criterio robusto es:

- Convertir concentración a carga diaria.
 - Identificar limitante dominante (carga, variabilidad, toxicidad):
 - o Elegir tecnología por compatibilidad con esa limitante.
- Esto eleva el capítulo de «descripción» a toma de decisiones.

CAPÍTULO 5

BACTERIAS Y SU ACCIÓN EN LA BIODEGRADACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La biodegradación de contaminantes en aguas residuales constituye un proceso esencial para la purificación de efluentes y depende, en gran medida, de la acción de bacterias. Estos microorganismos poseen la capacidad de descomponer compuestos orgánicos e inorgánicos, por lo que desempeñan un papel crucial en la mejora de la calidad del agua. La eficiencia y especificidad de estos procesos están determinadas por diversos factores, entre ellos el tipo de contaminante, las condiciones ambientales y las características del sistema de tratamiento utilizado.

En este capítulo se abordan tres procesos clave en los que intervienen bacterias en el tratamiento de aguas residuales: la desnitrificación y la eliminación de materia orgánica, los procesos aeróbicos y anaeróbicos en biorreactores, y la biorremediación de hidrocarburos y metales pesados.

5.1. DESNITRIFICACIÓN Y ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La desnitrificación es un proceso microbiológico mediante el cual las bacterias convierten el nitrato (NO_3^-) en nitrógeno gaseoso (N_2), y constituye un mecanismo fundamental para la reducción del nitrógeno presente en las aguas residuales. El exceso de nitrógeno en los cuerpos

de agua puede provocar eutrofización, lo que conlleva la proliferación excesiva de algas y la disminución del oxígeno disuelto, lo que afecta negativamente a la fauna acuática.

Diversos géneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Alcaligenes* y *Bacillus* son responsables de este proceso. En un estudio realizado por Metcalf y Eddy (2014) se evaluó el papel de bacterias desnitrificantes en la depuración de aguas residuales industriales, y se observó que *Pseudomonas stutzeri* y *Paracoccus denitrificans* lograron reducir la concentración de nitratos en aproximadamente un 80 % bajo condiciones anaeróbicas. Este proceso se ve favorecido en sistemas con baja disponibilidad de oxígeno, en los que los nitratos actúan como aceptores finales de electrones en el metabolismo bacteriano.

Además de la desnitrificación, la eliminación de materia orgánica constituye otro componente clave de la biodegradación en aguas residuales. En este proceso, bacterias aeróbicas y anaeróbicas descomponen compuestos orgánicos complejos, como carbohidratos, proteínas y grasas, transformándolos en productos más simples como dióxido de carbono y agua. Se ha demostrado que bacterias del género *Pseudomonas*, particularmente *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas aeruginosa*, son altamente eficaces en la remoción de contaminantes orgánicos en efluentes industriales, incluyendo aquellos provenientes de la industria textil, debido a su elevada versatilidad metabólica (Das & Chandran, 2011; Henze et al., 2008). Esta capacidad las convierte en candidatas idóneas para el tratamiento de aguas residuales de distintos sectores industriales.

5.2. PROCESOS AERÓBICOS Y ANAERÓBICOS EN BIORREACTORES

Los procesos aeróbicos y anaeróbicos constituyen la base del funcionamiento de los biorreactores empleados en el tratamiento de aguas residuales. Los biorreactores son sistemas diseñados para proporcionar condiciones controladas que optimizan la actividad metabólica de los microorganismos. En los procesos aeróbicos, las bacterias requieren oxígeno para la degradación de la materia orgánica, mientras que en los procesos anaeróbicos el oxígeno está ausente y se utilizan otros compuestos como aceptores de electrones.

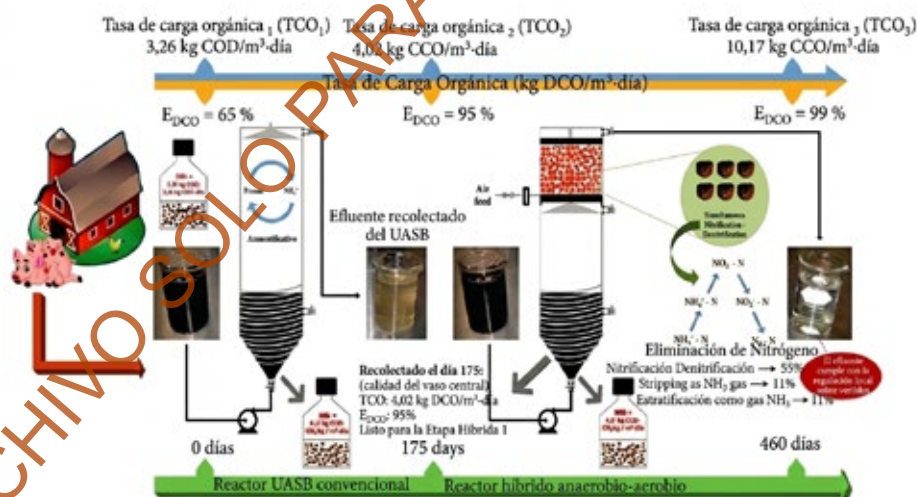
En los sistemas aeróbicos, la nitrificación es un proceso clave llevado a cabo por bacterias como *Nitrosomonas* y *Nitrospira*, las cuales convierten el amoníaco en nitrito y posteriormente en nitrato. Este proceso resulta fundamental para el tratamiento

de aguas residuales con altas concentraciones de amoníaco. Diversos estudios han demostrado que, en sistemas como biorreactores aeróbicos de lecho fijo, las bacterias nitrificantes pueden alcanzar altas eficiencias en la eliminación de amoníaco, evidenciando la efectividad de estos procesos (Metcalf & Eddy, 2014).

Por su parte, los procesos anaeróbicos son esenciales para la desnitrificación y la remoción de nutrientes como el fósforo. En estos sistemas, bacterias como *Paracoccus denitrificans* y *Bacillus subtilis* reducen los nitratos a nitrógeno gaseoso. López et al. (2022) reportaron que un reactor anaeróbico aplicado al tratamiento de aguas residuales industriales permitió una reducción del nitrógeno total de hasta un 78 %, así como una disminución del 65 % de los sólidos totales disueltos (TDS). La eficiencia de estos sistemas puede incrementarse mediante la optimización de parámetros operativos como la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulico, así como mediante el uso de biorreactores de flujo continuo.

FIGURA 8.

Rendimiento de un reactor híbrido anaerobio-aeróbico a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales porcinas



Adaptado de González-Tineo et al. (2020).

5.3. BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS Y METALES PESADOS

La biorremediación constituye una estrategia biotecnológica que emplea microorganismos para la degradación o transformación de contaminantes presentes en el medio ambiente, incluyendo hidrocarburos y metales pesados. En el tratamiento de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos, las bacterias desempeñan un papel fundamental debido a su capacidad para metabolizar estos compuestos y reducir su toxicidad.

Diversos estudios han demostrado que bacterias como *Pseudomonas putida*, *Alcaligenes eutrophus* y *Rhodococcus rhodochrous* presentan una alta capacidad para la degradación de hidrocarburos bajo diferentes condiciones ambientales. En este contexto, Chen et al. (2022) evaluaron la degradación de hidrocarburos derivados del petróleo en aguas residuales mediante bacterias del género *Pseudomonas*, y observaron una reducción de hasta el 87 % de los hidrocarburos presentes en un periodo de 10 días a temperatura ambiente. Este estudio resalta la importancia de la diversidad bacteriana en la eficiencia de los procesos de biorremediación, dado que distintas especies poseen capacidades metabólicas específicas para la degradación de diversos compuestos hidrocarbonados.

Además de los hidrocarburos, los metales pesados como el plomo (Pb), el cromo (Cr), el mercurio (Hg) y el cadmio (Cd) representan contaminantes frecuentes en aguas residuales industriales. La biorremediación de estos metales puede llevarse a cabo mediante distintos mecanismos, entre ellos la adsorción, la reducción y la metilación. Se ha demostrado que bacterias del género *Pseudomonas* son capaces de reducir el cromo hexavalente (Cr(VI)) a cromo trivalente (Cr(III)), una forma significativamente menos tóxica (Das & Chandran, 2011). Esta capacidad evidencia su alto potencial como agentes de biorremediación.

Por otro lado, la remoción de metales pesados puede complementarse mediante la fitorremediación, una estrategia que utiliza plantas para absorber y acumular metales en sus tejidos. Plantas acuáticas como *Lemna minor* han demostrado una elevada capacidad para remover metales pesados como el plomo y el cadmio de aguas contaminadas. Adicionalmente, estos sistemas pueden contribuir a la generación de biogás durante los procesos de biodegradación de la materia orgánica. La combinación de biorremediación microbiana y fitorremediación se presenta, por tanto, como una estrategia integral y prometedora para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados y compuestos orgánicos.

5.4. PRINCIPALES GÉNEROS DE BACTERIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

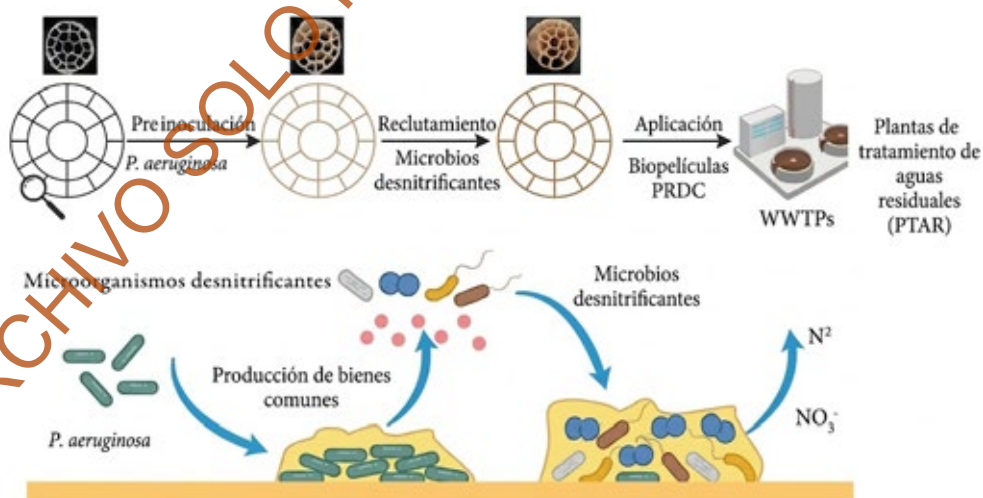
El tratamiento de aguas residuales constituye un proceso biológico complejo que involucra una amplia diversidad de microorganismos. Entre ellos, las bacterias desempeñan un papel central, ya que son responsables de la descomposición de compuestos orgánicos e inorgánicos, la eliminación de nutrientes y la biodegradación de contaminantes. A continuación, se describen algunos de los géneros bacterianos más relevantes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

5.4.1. Género *Pseudomonas*

Las bacterias del género *Pseudomonas* son ampliamente reconocidas por su elevada versatilidad metabólica y su capacidad para degradar una amplia gama de compuestos orgánicos, incluidos hidrocarburos, ácidos grasos y productos derivados de la industria petroquímica. Estas características las convierten en microorganismos clave en la biodegradación de compuestos complejos presentes en aguas residuales.

FIGURA 9.

Pseudomonas aeruginosa como activador para enriquecer consorcios desnitrificadores de alta eficiencia para el tratamiento de aguas residuales.



Adaptado de Wu et al. (2025).

Entre las especies más estudiadas se encuentran *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas putida*, las cuales se destacan por su capacidad para descomponer compuestos tóxicos y contribuir a la mejora de la calidad del agua. Así mismo, las bacterias del género *Pseudomonas* desempeñan un papel fundamental en los procesos de desnitrificación, ya que pueden convertir nitratos en nitrógeno gaseoso bajo condiciones anaeróbicas, lo que resulta esencial para el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de nitrógeno.

5.4.2. Género *Alcaligenes*

El género *Alcaligenes* incluye bacterias altamente eficientes en la biodegradación de compuestos como detergentes, grasas y aceites. Estas bacterias son comúnmente utilizadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales debido a su capacidad para descomponer materia orgánica bajo condiciones aeróbicas.

Alcaligenes eutrophus ha mostrado un alto rendimiento en la eliminación de materia orgánica, contribuyendo significativamente a la depuración de aguas residuales industriales. Su capacidad metabólica le permite degradar diversos compuestos orgánicos presentes en efluentes industriales, especialmente en sectores como el alimentario y el de detergentes (Madigan et al., 2018).

5.4.3. Género *Bacillus*

El género *Bacillus* se caracteriza por su capacidad para descomponer una amplia gama de compuestos orgánicos, incluidos carbohidratos, proteínas y grasas. Estas bacterias se encuentran presentes en numerosos sistemas de tratamiento de aguas residuales debido a su elevada versatilidad metabólica y su resistencia a condiciones ambientales adversas, como altas concentraciones de contaminantes.

Entre las especies más utilizadas en procesos de biorremediación y tratamiento de efluentes industriales se encuentran *Bacillus subtilis* y *Bacillus cereus*, las cuales contribuyen a la biodegradación de contaminantes orgánicos y a la reducción de sólidos suspendidos en aguas residuales (Rocco et al., 2024).

5.4.4. Género *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*

Las bacterias de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* desempeñan un papel fundamental en el proceso de nitrificación, mediante el cual el amoníaco es

convertido en nitrato. *Nitrosomonas* oxida el amoníaco a nitrito, mientras que *Nitrobacter* transforma el nitrito en nitrato.

Estos géneros bacterianos son esenciales en sistemas de tratamiento de aguas residuales con elevadas concentraciones de amoníaco, como las aguas provenientes de plantas de procesamiento de alimentos o de la industria química. Su acción es crítica para prevenir la contaminación por amoníaco y evitar los efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos (Mendoza et al., 2021).

5.4.5. Género *Paracoccus*

El género *Paracoccus* incluye bacterias que desempeñan un papel clave en los procesos de desnitrificación. En particular, *Paracoccus denitrificans* es conocida por su capacidad para reducir nitratos a nitrógeno gaseoso bajo condiciones anaeróbicas. Este proceso es fundamental para la eliminación de nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en aquellos destinados al tratamiento de efluentes ricos en nitratos, como los generados en la industria agrícola y de fertilizantes. Además, las bacterias del género *Paracoccus* participan en la degradación de materia orgánica y en la remoción de compuestos nitrogenados (Sun et al., 2024).

5.4.6. Género *Rhodococcus*

El género *Rhodococcus* se ha destacado por su elevada capacidad para biodegradar hidrocarburos y otros contaminantes complejos, como solventes y pesticidas. *Rhodococcus rhodochrous* es una de las especies más estudiadas en el contexto de la biorremediación y ha demostrado ser eficaz en la degradación de hidrocarburos en aguas residuales industriales, particularmente aquellas provenientes de la industria del petróleo. Su capacidad para degradar compuestos tóxicos tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas la convierte en una opción valiosa en los procesos de tratamiento de aguas contaminadas (Chen et al., 2022).

5.4.7. Género *Clostridium*

El género *Clostridium* está asociado principalmente a procesos anaeróbicos de degradación de materia orgánica en aguas residuales. Estas bacterias participan en la fermentación de compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno, con lo que producen ácidos grasos volátiles, metano y dióxido de carbono.

En sistemas de tratamiento anaeróbico, como los digestores de metano, *Clostridium* desempeña un papel esencial en la conversión de materia orgánica en biogás, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía renovable (DelaVega-Quintero et al., 2025).

5.4.8. Género *Thiobacillus*

Las bacterias del género *Thiobacillus* son particularmente importantes en el tratamiento de aguas residuales que contienen compuestos sulfurados, como los efluentes provenientes de la industria petroquímica y minera.

Estas bacterias oxidan compuestos sulfurados, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), transformándolos en azufre elemental o ácido sulfúrico, lo que contribuye a la reducción de la toxicidad de los contaminantes sulfurados presentes en las aguas residuales (Dai et al., 2024).

5.5. TIPOS DE BIORREACTORES UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento biológico de aguas residuales mediante biorreactores es ampliamente empleado debido a su elevada eficacia en la reducción de contaminantes orgánicos, nutrientes y metales pesados (Ferrero et al., 2020). Estos sistemas generan condiciones ambientales óptimas para el crecimiento y la actividad metabólica de microorganismos capaces de degradar los contaminantes de forma eficiente, lo que posibilita la reutilización del agua tratada en diversas aplicaciones industriales y agrícolas.

5.5.1. Biorreactores de lecho fijo (FBR)

Los biorreactores de lecho fijo se caracterizan por la presencia de un soporte sólido sobre el cual se desarrolla una biopelícula microbiana, lo que contribuye significativamente a la estabilidad del proceso de depuración. Este tipo de biorreactor permite alcanzar altas eficiencias en la remoción de materia orgánica y nutrientes, debido a la capacidad de los microorganismos adheridos para degradar compuestos específicos de manera sostenida.

Ventajas

- Alta eficiencia en la remoción de materia orgánica, atribuida a la formación de biopelículas microbianas.

- Reducción en la producción de lodos en comparación con sistemas de biomasa suspendida (Hartl et al., 2022).
- Operación estable y mayor resistencia frente a fluctuaciones en la carga contaminante.

Aplicaciones

Los biorreactores de lecho fijo se emplean en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales con alta carga orgánica, particularmente en sectores como la industria textil y alimentaria, en las que predominan compuestos orgánicos biodegradables (Hartl et al., 2022).

Géneros bacterianos predominantes: *Pseudomonas*, *Alcaligenes* y *Bacillus*.

5.5.2. Reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB)

Los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) son sistemas que operan en ausencia de oxígeno y permiten la descomposición de la materia orgánica mediante procesos anaeróbicos, generando biogás como subproducto energético (Hernández et al., 2021). En estos reactores, el efluente fluye de manera ascendente a través de un lecho granular de biomasa, donde los microorganismos anaerobios transforman los contaminantes orgánicos.

Ventajas

- Producción de biogás aprovechable como fuente de energía renovable.
- Baja generación de lodos en comparación con sistemas aeróbicos convencionales (Torres et al., 2024).
- Menores requerimientos energéticos, al no necesitar sistemas de aireación mecánica.

Aplicaciones

Los reactores UASB son ampliamente utilizados en el tratamiento de efluentes de la industria alimentaria y láctea, así como en aguas residuales municipales con elevada carga de materia orgánica (Torres et al., 2024).

Géneros bacterianos predominantes: *Clostridium*, *Desulfovibrio* y *Methanosaeta*.

5.5.3. Biorreactores de membrana (MBR)

Los biorreactores de membrana combinan procesos biológicos con sistemas de filtración mediante membranas, lo que permite obtener un efluente tratado de alta calidad (Li et al., 2023). Este tipo de sistema emplea una barrera física que separa los sólidos suspendidos y los microorganismos del efluente tratado, con lo que mejoran significativamente la eficiencia del proceso de depuración.

Ventajas

- Alta eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos y microorganismos patógenos.
- Producción de un efluente de elevada calidad, adecuado para su reutilización en aplicaciones industriales y agrícolas (Wang & Zhao, 2024).
- Diseño compacto, apropiado para instalaciones con limitaciones de espacio.

Aplicaciones

Los biorreactores de membrana son ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales con estrictos requerimientos de calidad del efluente. Destaca su aplicación en las industrias farmacéutica y electrónica.

Géneros bacterianos predominantes: *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* y *Pseudomonas*.

5.5.4. Biorreactores de lecho móvil (MBBR)

Los biorreactores de lecho móvil incorporan medios plásticos móviles que proporcionan una elevada superficie específica para la adhesión y el crecimiento de microorganismos, lo que favorece el desarrollo de biopelículas activas (Zhou et al., 2022). Esta configuración permite incrementar la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y nutrientes, de modo que supera el desempeño de los sistemas biológicos convencionales.

Ventajas

- Alta capacidad de carga orgánica y elevada flexibilidad operativa.
- Menor producción de lodos en comparación con procesos convencionales de biomasa suspendida (Gao et al., 2022).

- Mayor estabilidad del proceso frente a variaciones en el caudal y en la carga contaminante.

Aplicaciones

Los biorreactores de lecho móvil se utilizan ampliamente en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, así como en sistemas de pretratamiento de efluentes antes de su descarga final o de etapas posteriores de tratamiento.

Géneros bacterianos predominantes: *Bacillus*, *Rhodococcus* y *Pseudomonas*.

5.5.5. Biorreactores secuenciales (SBR)

Los biorreactores secuenciales operan mediante ciclos de tratamiento que incluyen fases diferenciadas de llenado, aireación, sedimentación y descarga, lo que permite un control preciso del proceso biológico (López & Martínez, 2024). Esta modalidad de operación los convierte en sistemas altamente flexibles y eficientes para la remoción de materia orgánica y nutrientes.

Ventajas

- Control preciso de las condiciones operativas y alta eficiencia en la eliminación de nutrientes.
- Reducción significativa de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y de la demanda química de oxígeno (DQO) (López & Martínez, 2024).
- Menor requerimiento de espacio en comparación con sistemas de operación continua.

Aplicaciones

Los biorreactores secuenciales se emplean en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales con composición variable. Son especialmente adecuados para pequeñas y medianas comunidades.

Géneros bacterianos predominantes: *Pseudomonas*, *Nitrosomonas* y *Bacillus*.

5.6. CASO APLICADO: DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UN REACTOR UASB PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Contexto del problema

Una planta láctea busca reducir DQO y costos de aireación implementando un sistema anaerobio UASB, con recuperación energética vía biogás. El effluente presenta alta biodegradabilidad, pero variaciones diarias por ciclos de lavado y producción.

Datos de entrada

- **Caudal medio:** 120 m³/d
- **DQO influente promedio:** 3500 mg/L
- **Meta:** reducir carga orgánica antes de un tratamiento aeróbico de pulido
- **Carga volumétrica de diseño (preliminar):** 5 kg DQO/m³.d

Paso 1: Carga orgánica diaria (DQO)

$$3500 \text{ mg/L} = 3,5 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Carga diaria} = 120 \text{ m}^3/\text{d} \times 3,5 \text{ kg/m}^3 = 420 \text{ kg DQO/d}$$

Paso 2: Volumen del reactor por carga volumétrica

$$V = (420 \text{ kg/d}) / (5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}) = 84 \text{ m}^3$$

Paso 3: Verificación con tiempo de retención hidráulica (TRH)

En UASB, además de la carga, se revisa el TRH para evitar velocidades hidráulicas excesivas. TRH preliminar:

$$\text{TRH} = V / Q = 84 \text{ m}^3 / 120 \text{ m}^3/\text{d} = 0,70 \text{ d} = 16,8 \text{ h}$$

Ese TRH es coherente para un UASB en effluentes biodegradables.

Paso 4: Estimación de remoción y biogás (nivel aplicado)

Supongamos remoción de DQO conservadora del 75 %:

$$\text{DQO removida} = 420 \times 0,75 = 315 \text{ kg DQO/d}$$

Producción teórica de metano: 0,35 m³ CH₄/kg DQO removida

$$\text{CH}_4 \approx 315 \times 0,35 = 110,25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$$

Si el biogás tuviera 60 % CH_4 , biogás total $\approx 110,25 / 0,60 = 183,75 \text{ m}^3 \text{ biogás/d}$.

Paso 5: Interpretación técnica

El UASB reduce sustancialmente la DQO y genera energía, pero el efluente aún puede contener sólidos y DQO remanente; por eso se recomienda un tratamiento de pulido (aeróbico, biofiltro o MBR), dependiendo del estándar de descarga / reúso.

Dado que la industria láctea tiene picos, es recomendable un tanque de ecualización previo para estabilizar Q y DQO (mejora estabilidad del UASB).

Conclusión del caso

El dimensionamiento preliminar (84 m^3 , TRH $\approx 17 \text{ h}$) muestra viabilidad técnica. La estimación de biogás ($\approx 184 \text{ m}^3/\text{d}$) añade valor aplicado y conecta con sostenibilidad energética.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

CAPÍTULO 6

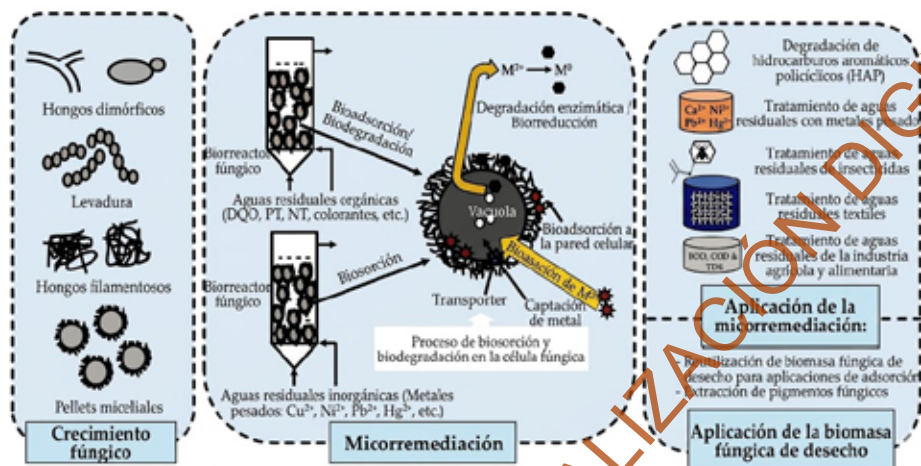
HONGOS Y SU CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

Los hongos han emergido como una de las herramientas más prometedoras para la remediación de aguas residuales, debido a su notable capacidad para degradar y transformar una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Su habilidad para descomponer compuestos complejos, incluidos aquellos de estructura recalcitrante, los convierte en agentes clave en el tratamiento de efluentes industriales, agrícolas y domésticos.

Así mismo, la biorremediación fúngica se distingue por su bajo costo operativo, alta eficiencia y capacidad para funcionar en condiciones ambientales adversas, como variaciones extremas de pH, temperatura y concentración de contaminantes. Estas características hacen que los hongos sean especialmente adecuados para su aplicación en procesos de tratamiento en contextos industriales y ambientales (Rodríguez-Couto & Rodríguez, 2020).

FIGURA 10.

Micorremediación de aguas residuales



Adaptado de Negi y Das (2023).

6.1. ENZIMAS LIGNINOLÍTICAS Y SU ACCIÓN EN LA DEGRADACIÓN

Las enzimas ligninolíticas desempeñan un papel fundamental en la capacidad de los hongos para degradar compuestos complejos presentes en diversos efluentes industriales, tales como xilanos, hemicelulosas y compuestos fenólicos. Estas enzimas, entre las que se incluyen las ligninasas, la manganoso peroxidasa y las lacasas, permiten la descomposición de estructuras lignocelulósicas y otros contaminantes orgánicos persistentes, al transformarlas en compuestos menos tóxicos y más fácilmente biodegradables.

Entre los hongos más estudiados por su elevada producción de enzimas ligninolíticas destacan *Phanerochaete chrysosporium* y *Trametes versicolor*, los cuales han demostrado una alta eficiencia en la degradación de colorantes, pesticidas y compuestos aromáticos presentes en aguas residuales (Bortoluzzi et al., 2020; Rodríguez-Couto & Rodríguez, 2020; Hernández et al., 2020).

Los procesos enzimáticos asociados a la biorremediación fúngica actúan principalmente a través de mecanismos de óxido-reducción, los cuales facilitan la oxidación y posterior mineralización de los contaminantes, por lo que reducen

significativamente la toxicidad de los efluentes tratados (Sharma & Arora, 2020). Así mismo, ha quedado en evidencia que estas enzimas no solo contribuyen a la degradación de compuestos orgánicos, sino también a la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales industriales. En este contexto, estudios recientes con *Trametes versicolor* han demostrado que la acción combinada de enzimas ligninolíticas permite una reducción significativa de la toxicidad de efluentes textiles que contienen colorantes azoicos (Bortoluzzi et al., 2020).

6.2. TIPOS DE HONGOS UTILIZADOS EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

6.2.1. *Phanerochaete chrysosporium*

Este hongo basidiomiceto es ampliamente reconocido por su elevada capacidad para producir enzimas ligninolíticas, en particular la manganoso peroxidasa, la cual resulta altamente eficaz en la degradación de compuestos complejos y tóxicos, como colorantes, pesticidas y diversos productos químicos industriales. *Phanerochaete chrysosporium* ha sido ampliamente utilizado en la remediación de aguas residuales, especialmente en la eliminación de compuestos fenólicos y aromáticos (Rodríguez-Couto & Rodríguez, 2020; Hernández et al., 2020).

6.2.2. *Trametes versicolor*

Trametes versicolor es otro hongo basidiomiceto destacado por su capacidad para producir lacasas, enzimas que desempeñan un papel clave en la oxidación de contaminantes recalcitrantes presentes en aguas residuales. Este hongo ha sido aplicado con éxito en el tratamiento de efluentes industriales, particularmente en la industria textil, en la que predominan los compuestos azoicos de difícil degradación (Bortoluzzi et al., 2020).

6.2.3. *Pleurotus ostreatus*

Conocido comúnmente como hongo ostra, *Pleurotus ostreatus* presenta un alto potencial para la biodegradación de compuestos orgánicos, incluidos pesticidas y metales pesados. Este hongo ha demostrado ser eficaz en la eliminación de compuestos fenólicos presentes en aguas residuales industriales, como aquellas generadas por la industria del papel y la pulpa (Hernández et al., 2020).

6.2.4. *Ganoderma lucidum*

Ganoderma lucidum, conocido como hongo reishi, ha demostrado una elevada eficiencia en la remoción de metales pesados y compuestos orgánicos presentes en aguas residuales industriales. Su aplicación ha sido reportada principalmente en efluentes provenientes de la industria farmacéutica y minera, debido a su capacidad para absorber contaminantes a través de su extensa red micelial (Liu et al., 2021; Rani & Mehta, 2021).

6.2.5. *Aspergillus niger*

Este hongo filamentoso ha sido ampliamente utilizado en procesos de biorremediación, particularmente en la adsorción de metales pesados. *Aspergillus niger* presenta una notable capacidad para remover metales como plomo, cadmio y mercurio de efluentes industriales, lo que lo convierte en una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas (Baig & Khan, 2021; Rani & Mehta, 2021).

6.2.6. *Fusarium solani*

Fusarium solani posee la capacidad de degradar compuestos orgánicos complejos y ha sido empleado en la biodegradación de compuestos aromáticos presentes en efluentes de la industria petroquímica y del plástico. Su actividad metabólica contribuye a la reducción de la carga contaminante y a la mejora de la calidad del efluente tratado (Rodríguez Couto & Rodríguez, 2020).

6.3. ELIMINACIÓN DE FÁRMACOS Y COMPUESTOS EMERGENTES

En los últimos años, la presencia de fármacos y compuestos emergentes en aguas residuales se ha convertido en un desafío crítico para los sistemas de tratamiento convencionales. Residuos de medicamentos, productos de cuidado personal y otros contaminantes emergentes han sido detectados en diversos cuerpos de agua, lo cual ha generado impactos negativos en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos.

En este contexto, los hongos, particularmente los basidiomicetos como *Phanerochaete chrysosporium* y *Ganoderma lucidum*, han demostrado una notable capacidad para biodegradar este tipo de contaminantes (Liu et al., 2021; Jiménez et al., 2021). Estos microorganismos actúan principalmente mediante la producción de enzimas ligninolíticas, tales como lacasas y manganeso peroxidasas, que oxidan y

modifican estructuralmente los compuestos farmacéuticos, con lo que reducen significativamente su toxicidad y persistencia ambiental (Gupta & Jain, 2020).

Diversos estudios han mostrado que *Phanerochaete chrysosporium* es capaz de degradar antibióticos y antiinflamatorios presentes en aguas residuales a través de mecanismos enzimáticos específicos (Rodríguez-Couto & Rodríguez, 2020). De manera similar, investigaciones recientes han demostrado la efectividad de *Ganoderma lucidum* en la remoción simultánea de metales pesados y residuos farmacéuticos en efluentes industriales (Liu et al., 2021). En conjunto, el uso de hongos para la eliminación de compuestos emergentes representa una estrategia sostenible que contribuye a la reducción de la contaminación y a la protección de los ecosistemas acuáticos.

6.4. APLICACIONES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

El tratamiento de aguas residuales industriales constituye uno de los ámbitos en los que la biorremediación fúngica ha mostrado mayores beneficios. Estos efluentes suelen contener una amplia variedad de contaminantes, incluidos metales pesados, productos químicos tóxicos y compuestos orgánicos complejos, cuya eliminación resulta limitada mediante tecnologías convencionales.

Hongos como *Aspergillus niger*, *Frametes versicolor* y *Pleurotus ostreatus* han sido ampliamente estudiados por su capacidad para remover contaminantes presentes en aguas industriales mediante procesos de biosorción, bioacumulación y biodegradación (Rani & Mehta, 2021). Además de la eliminación de compuestos orgánicos, se ha demostrado que estos hongos pueden reducir significativamente la concentración de metales pesados, tales como plomo, cadmio y mercurio, presentes en efluentes industriales (Baig & Khan, 2021).

Estudios recientes indican que la combinación de tratamientos biológicos basados en hongos con procesos físicos, como la adsorción, incrementa notablemente la eficiencia del tratamiento de aguas industriales (Ali & Hamid, 2021). Por ejemplo, *Pleurotus ostreatus* ha sido aplicado con éxito en el tratamiento de efluentes de la industria textil, pues ha logrado una remoción eficaz de colorantes y compuestos fenólicos (Hernández et al., 2020). Así mismo, estos microorganismos están siendo integrados en sistemas de biorreactores que combinan la acción fúngica con tecnologías avanzadas de filtración y adsorción, lo que permite el tratamiento de efluentes industriales complejos.

La biorremediación fúngica aplicada a aguas residuales industriales no solo contribuye a la reducción de la toxicidad ambiental, sino que también ofrece oportunidades para la recuperación de productos de valor, como metales pesados y ciertos compuestos químicos (Rani & Mehta, 2021). En este sentido, el uso de hongos se alinea con los principios de la economía circular, al transformar contaminantes en recursos aprovechables y minimizar el impacto ambiental de los procesos industriales.

6.5. CASO APLICADO: TRATAMIENTO DE EFLUENTE TEXTIL MEDIANTE *TRAMETES VERSICOLOR*

Contexto del problema

Una industria textil presenta efluentes con colorantes azoicos (recalcitrantes), que generan color residual y toxicidad incluso después de procesos convencionales. Se evalúa un tratamiento biológico con hongos por su capacidad ligninolítica.

Datos de entrada

- **Volumen a tratar:** 10 m^3
- **Concentración de colorante:** 200 mg/L
- **pH de operación:** 5,5
- **Temperatura:** 28°C
- **Tiempo de contacto:** 72 h
- **Microorganismo:** *Trametes versicolor*

Paso 1: Estimación de la masa total del colorante presente

$$200 \text{ mg/L} = 200 \text{ g/m}^3$$

$$\text{Masa total} = 200 \text{ g/m}^3 \times 10 \text{ m}^3 = 2\,000 \text{ g} = 2 \text{ kg de colorante}$$

Paso 2: Estimación del desempeño esperado

Si el sistema logra 85 % de remoción:

- **Masa removida** = $2 \text{ kg} \times 0,85 = 1,7 \text{ kg}$
- **Masa residual** = $2 \text{ kg} - 1,7 \text{ kg} = 0,3 \text{ kg}$

Paso 3: Explicación del «porqué funciona»

Los colorantes azoicos pueden resistir biodegradación bacteriana por su estructura; en cambio, *T. versicolor* produce lacasas y peroxidasas que actúan por oxidación y ruptura de enlaces, reduciendo color y toxicidad.

Además del «color», importa la toxicidad: dos efluentes con igual color pueden tener toxicidad diferente. Por eso se recomienda, al menos conceptualmente, un bioensayo o indicador de toxicidad (el libro puede mencionarlo sin profundizar).

Paso 4: Recomendación de configuración

Para escala piloto, un reactor *batch* es razonable.

Para escala mayor, se sugiere inmovilización del hongo en soporte o biopelícula (mejor estabilidad y reutilización).

Conclusión del caso

El caso cuantifica el problema (2 kg de colorante) y muestra un resultado tangible (1,7 kg removidos). Se evidencia por qué la vía enzimática fúngica es adecuada cuando la limitante es la recalcitrancia química, no la carga orgánica.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

CAPÍTULO 7

PLANTAS ACUÁTICAS Y SU PAPEL EN LA FITORREMEDIACIÓN

Las plantas acuáticas desempeñan un papel fundamental en la fitorremediación, un proceso biotecnológico que aprovecha la capacidad de determinados organismos vegetales para absorber, acumular, transformar o estabilizar contaminantes presentes en los ecosistemas acuáticos. Mediante diversos mecanismos fisiológicos y bioquímicos, estas plantas contribuyen a la mitigación del impacto de metales pesados, nutrientes en exceso y otros contaminantes asociados a aguas residuales de origen doméstico, agrícola e industrial (Rivera Intriago et al., 2021).

La fitorremediación se considera una alternativa sostenible y de bajo costo, ya que permite mejorar la calidad del agua utilizando procesos naturales, con un impacto ambiental reducido y un alto potencial de aplicación en sistemas de tratamiento descentralizados y humedales construidos.

7.1. MECANISMOS DE ABSORCIÓN Y ACUMULACIÓN DE CONTAMINANTES

Las plantas acuáticas emplean diversos mecanismos fisiológicos y bioquímicos para la remoción de contaminantes presentes en el agua. Estos mecanismos actúan de manera complementaria y determinan la eficiencia de los procesos de fitorremediación en ecosistemas acuáticos contaminados.

7.1.1. Absorción radicular y foliar

La absorción de contaminantes ocurre principalmente a través del sistema radicular en plantas emergentes y sumergidas; sin embargo, en especies flotantes, como *Eichhornia crassipes*, la absorción foliar desempeña un papel relevante. Los iones metálicos y otros contaminantes ingresan a la planta mediante canales y transportadores específicos localizados en la membrana plasmática, a través de mecanismos de transporte activo y pasivo.

El transporte activo involucra el uso de ATPasas y proteínas transportadoras especializadas, mientras que el transporte pasivo ocurre mediante procesos de difusión facilitada. Estudios han demostrado que especies como *Typha latifolia* y *Phragmites australis* presentan una elevada eficiencia en la absorción de metales pesados, como cadmio y plomo, debido a la presencia de transportadores específicos de cationes divalentes (Klink, 2017).

7.1.2. Bioacumulación

La bioacumulación consiste en la retención progresiva de contaminantes dentro de los tejidos vegetales a lo largo del tiempo. En este proceso, los metales pesados son secuestrados principalmente en la vacuola celular mediante la acción de metalotioneínas y fitoquelatinas, compuestos que reducen la toxicidad intracelular y protegen las funciones metabólicas de la planta.

Investigaciones recientes indican que *Lemna minor* puede acumular arsénico y mercurio en concentraciones elevadas sin afectar significativamente su crecimiento ni su actividad fisiológica (Sasmaz Kislioglu, 2023). Este mecanismo resulta especialmente relevante para la remediación de cuerpos de agua contaminados con metales pesados y pesticidas organoclorados.

7.1.3. Fitoestabilización

La fitoestabilización se basa en la inmovilización de los contaminantes en la rizosfera o dentro de los tejidos vegetales, que evita su movilización y dispersión en el ambiente acuático. Este mecanismo reduce la biodisponibilidad de los contaminantes y limita su incorporación a la cadena trófica.

Especies como *Scirpus validus* y *Phragmites australis* han demostrado una alta capacidad para estabilizar contaminantes, al favorecer la precipitación de metales

pesados y su adsorción en partículas del suelo y en la materia orgánica presente en el sedimento (Wang et al., 2024).

7.1.4. Fitotransformación

La fitotransformación consiste en la modificación química de los contaminantes mediante la acción de enzimas vegetales como peroxidasas, oxidasas y reductasas. Estas enzimas permiten transformar compuestos tóxicos en sustancias menos peligrosas o más fácilmente biodegradables, lo que facilita la eliminación del ecosistema acuático.

Plantas como *Myriophyllum aquaticum* y *Hydrilla verticillata* han demostrado ser eficaces en la degradación de compuestos orgánicos persistentes, incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y pesticidas organofosforados, lo cual conlleva una reducción significativa de su toxicidad ambiental (Kafle, 2022).

7.1.5. Rizofiltración

La rizofiltración se refiere a la retención y acumulación de contaminantes a través del sistema radicular de las plantas acuáticas. Este mecanismo resulta particularmente eficaz en la remoción de metales pesados disueltos, ya que las raíces actúan como una superficie de adsorción y absorción.

Especies con sistemas radiculares extensos, como *Eichhornia crassipes* y *Typha angustifolia*, han mostrado una elevada capacidad para retener metales pesados, como plomo y níquel, en sus raíces. Este proceso evita la dispersión de los contaminantes en el cuerpo de agua y permite su eliminación posterior mediante la cosecha controlada de la biomasa contaminada (Fernández-Gómez et al., 2023).

7.1.6. Fitoextracción

La fitoextracción implica la absorción y acumulación activa de contaminantes en los tejidos vegetales, principalmente en raíces, tallos y hojas, de manera que facilita su remoción del sistema mediante la cosecha de la biomasa. Este mecanismo es ampliamente utilizado para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados.

Pistia stratiotes ha sido empleada con éxito en la remediación de aguas con altas concentraciones de arsénico y plomo: ha alcanzado eficiencias de remoción superiores al 80 % en estudios experimentales recientes (Almeida et al., 2024).

7.1.7. Fitovolatilización

La fitovolatilización consiste en la transformación de determinados contaminantes en compuestos volátiles que son posteriormente liberados a la atmósfera a través de los tejidos vegetales. Si bien este mecanismo reduce la concentración de contaminantes en el agua, su aplicación requiere una evaluación cuidadosa del impacto ambiental asociado a la liberación atmosférica.

Especies como *Salvinia molesta* y *Lemna gibba* han demostrado la capacidad de volatilizar mercurio y compuestos orgánicos clorados. Así, han contribuido a la reducción de su presencia en cuerpos de agua contaminados.

7.2. USO EN HUMEDALES ARTIFICIALES

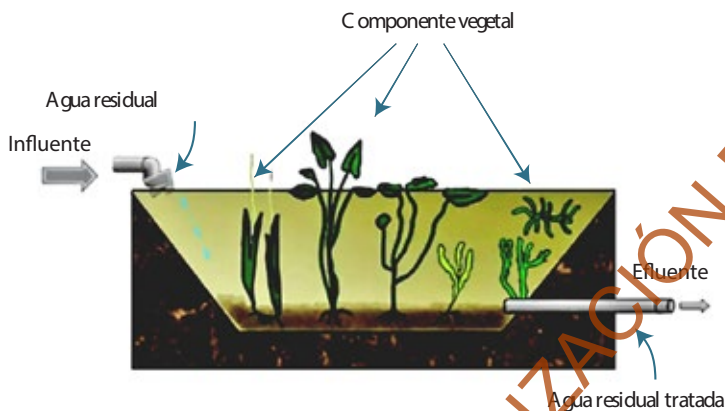
Los humedales artificiales son sistemas diseñados para replicar los procesos naturales de depuración del agua mediante la interacción sinérgica entre plantas acuáticas, microorganismos y sustratos. Estos sistemas presentan una elevada capacidad para el tratamiento de aguas residuales y contaminadas, por lo que contribuyen a la mejora de la calidad del agua y a la reducción de la carga contaminante.

En los humedales artificiales, las plantas acuáticas desempeñan un papel fundamental a través de diversos mecanismos. En primer lugar, contribuyen a la oxigenación del agua mediante la fotosíntesis, lo que incrementa la disponibilidad de oxígeno disuelto y favorece la actividad de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes orgánicos. Así mismo, participan activamente en la remoción de nutrientes, ya que absorben compuestos como nitrógeno y fósforo, los cuales son responsables de procesos de eutrofización en cuerpos de agua. Adicionalmente, los sistemas radiculares de las plantas facilitan la filtración de sólidos suspendidos, al retener partículas y mejorar significativamente la calidad del efluente tratado (Deago et al., 2024).

Los humedales artificiales pueden clasificarse principalmente según la dirección del flujo del agua a través del lecho vegetal. Entre los tipos más comunes se encuentran los humedales de flujo superficial, los humedales de flujo subsuperficial y los sistemas híbridos, los cuales combinan ambos tipos de flujo con el fin de optimizar la eficiencia del tratamiento.

FIGURA 11.

Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación



Adaptado de Luna-Pabello y Aburto-Castañeda (2014).

7.2.1. Humedales artificiales de flujo superficial

En los humedales artificiales de flujo superficial, el agua fluye libremente sobre la superficie del lecho vegetal, de modo que reproduce de manera controlada los procesos naturales de depuración. El tratamiento del agua se produce a través de la interacción entre plantas acuáticas, microorganismos y el sustrato, lo que permite la remoción de diversos contaminantes.

Características y funcionamiento

- Sustrato

El lecho del humedal está constituido por materiales porosos, como arena, grava o sustratos orgánicos, que permiten el paso del agua y proporcionan un soporte adecuado para el desarrollo de las raíces de las plantas y de comunidades microbianas asociadas.

- Vegetación

Se emplean principalmente plantas acuáticas emergentes, flotantes o sumergidas, entre las que destacan *Typha latifolia*, *Scirpus lacustris*, *Eichhornia crassipes* y

Phragmites australis. Estas especies desempeñan un papel fundamental en la filtración de sólidos suspendidos y en la absorción de nutrientes presentes en el agua.

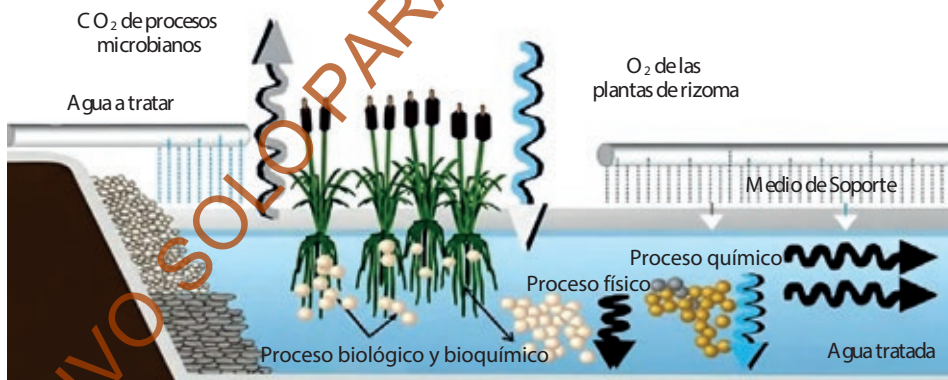
- Remoción de contaminantes

Este tipo de humedal resulta eficaz en la eliminación de metales pesados, nutrientes y materia orgánica de aguas residuales. La retención de sólidos ocurre a través del sistema radicular y del sustrato, mientras que las plantas contribuyen a la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, con lo que reducen el riesgo de eutrofización (Durán Mera & Lino García, 2023).

Los humedales de flujo superficial se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas y agrícolas. El contacto directo del agua con las plantas y la atmósfera favorece el intercambio gaseoso, lo que contribuye a la eliminación de contaminantes volátiles y al fortalecimiento de los procesos biológicos del sistema (Rivera Intriago et al., 2021).

FIGURA 12.

Principales componentes y procesos depurativos en humedales artificiales



Adaptado de Luna-Pabello y Aburto-Castañeda (2014).

7.2.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el agua circula a través de un sustrato poroso situado por debajo de la superficie, sin contacto directo con la atmósfera. Este tipo de sistema resulta especialmente eficaz para el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de nutrientes y compuestos orgánicos, al favorecer procesos físicos, químicos y biológicos en condiciones más controladas.

Características y funcionamiento

- Sustrato

El lecho del humedal está constituido por capas de arena, grava o piedra, las cuales permiten el flujo del agua y evitan que las plantas floten en la superficie. Este diseño favorece una mayor filtración de sólidos y reduce la liberación de contaminantes volátiles al ambiente.

- Vegetación

Se emplean principalmente plantas acuáticas emergentes con sistemas radiculares profundos, como *Phragmites australis* y *Typha latifolia*. Estas especies interactúan estrechamente con los microorganismos presentes en la rizosfera, al promover la degradación de contaminantes orgánicos y la absorción de nutrientes (Deago et al., 2024).

- Tratamiento del agua

El agua fluye a través del sustrato y entra en contacto con las raíces y la comunidad microbiana asociada, donde se produce la degradación de materia orgánica y la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Este tipo de humedal ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil, alimentaria y de escorrentías pluviales contaminadas (Durán Mera & Lino García, 2023).

Los humedales de flujo subsuperficial se utilizan ampliamente en la depuración de aguas urbanas y agroindustriales, y presentan la ventaja de ser menos propensos a la evaporación y al crecimiento de maleza, lo que los hace adecuados para diversas condiciones climáticas y geográficas (Campana Chávez, 2023).

7.2.3. Humedales artificiales híbridos

Los humedales artificiales híbridos combinan los principios de funcionamiento de los humedales de flujo superficial y subsuperficial, con el objetivo de maximizar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. Este enfoque integrado, al permitir el aprovechamiento de las ventajas de ambos tipos de flujo, logra una remoción más completa y eficiente de contaminantes.

Características y funcionamiento

- Sustrato

Estos sistemas utilizan una combinación de sustratos porosos dispuestos en diferentes capas, lo que permite la coexistencia de flujo superficial y subsuperficial. La disposición estratificada del sustrato genera distintas condiciones hidráulicas y bioquímicas que favorecen la filtración y el tratamiento del agua.

- Vegetación

En los humedales híbridos se emplean tanto plantas emergentes como flotantes, entre las que destacan *Lemna minor*, *Eichhornia crassipes* y *Scirpus lacustris*. Estas especies se adaptan a los diferentes regímenes de flujo y actúan de manera sinérgica en la remoción de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos (Rivera Intriago et al., 2021).

- Tratamiento del agua

La combinación de flujo superficial y subsuperficial permite tratar una amplia gama de contaminantes, incluidos nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos complejos. Esta configuración incrementa la eficiencia del proceso y la capacidad de tratamiento del sistema en comparación con humedales de un solo tipo de flujo (Deago et al., 2024).

Los humedales híbridos resultan especialmente útiles en situaciones en las que se requiere una alta carga de tratamiento o cuando se enfrentan efluentes con contaminantes complejos, como aguas residuales industriales o provenientes de zonas urbanas altamente contaminadas (Campana Chávez, 2023).

7.3. CASOS DE ÉXITO EN LA RECUPERACIÓN DE ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

La biorremediación mediante humedales artificiales ha demostrado ser una estrategia eficaz para la recuperación de ecosistemas acuáticos afectados por diversos tipos de contaminación. A través de proyectos implementados en distintas regiones del mundo, se han logrado avances significativos en la mejora de la calidad del agua, la restauración de hábitats naturales y la reducción de contaminantes de origen industrial, agrícola y urbano. A continuación, se presentan algunos casos representativos de aplicación exitosa de esta tecnología.

7.3.1. Lago Victoria, África

El lago Victoria, el cuerpo de agua dulce más grande de África y uno de los más extensos del mundo, ha experimentado una degradación progresiva debido a la actividad industrial, el vertido de aguas residuales sin tratamiento y la escorrentía agrícola. Estas presiones antrópicas han provocado procesos severos de eutrofización que han afectado la biodiversidad y la calidad del agua.

Estrategia implementada

En diversas zonas del lago se implementaron sistemas de humedales artificiales flotantes utilizando *Eichhornia crassipes* (lirio acuático). Esta especie presenta una alta capacidad de absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, responsables de la proliferación excesiva de algas. Así mismo, ha demostrado eficacia en la remoción de metales pesados como plomo y mercurio, asociados a descargas industriales.

Resultados obtenidos

La intervención permitió reducir significativamente la carga de nutrientes, disminuir los procesos de eutrofización y favorecer la recuperación del equilibrio ecológico. Además, se observó una mejora sustancial en la calidad del agua, lo que contribuyó a la restauración de hábitats de peces y otros organismos acuáticos, fundamentales para las comunidades locales. La disminución de metales pesados también generó beneficios en materia de salud pública, al reducir los riesgos asociados al consumo de agua y pescado contaminados.

7.3.2. Río Bogotá, Colombia

El río Bogotá constituye uno de los sistemas hídricos más importantes de Colombia; sin embargo, durante décadas ha sido afectado por vertimientos industriales, residuos domésticos y aguas pluviales contaminadas, lo que ha deteriorado gravemente su calidad ambiental y su biodiversidad.

Estrategia implementada

Los proyectos de biorremediación desarrollados en el río han incorporado sistemas de humedales artificiales utilizando *Typha latifolia* y *Phragmites australis*. Se implementaron configuraciones híbridas de flujo superficial y subsuperficial con el objetivo de maximizar la eficiencia en la remoción de nutrientes, metales pesados y materia orgánica.

Resultados obtenidos

Como resultado, se registró una mejora significativa en la calidad del agua, evidenciada por la reducción de nitrógeno, fósforo y contaminantes orgánicos. Así mismo, se observó un aumento progresivo de la biodiversidad acuática y la recuperación de los ecosistemas ribereños. Los humedales artificiales actuaron como filtros naturales, pues disminuyeron la carga de residuos industriales y contribuyeron a la mejora de la calidad del agua para usos recreativos y de abastecimiento.

7.3.3. Parque Natural de la Albufera, España

La Albufera, un sistema de humedales costeros situado en la Comunidad Valenciana, es reconocida por su alto valor ecológico y su biodiversidad. No obstante, la intensificación agrícola en su entorno ha generado un aporte excesivo de nitratos y fosfatos, lo que ha provocado procesos de eutrofización que han alterado el equilibrio del ecosistema.

Estrategia implementada

Se desarrollaron humedales artificiales utilizando especies como *Scirpus lacustris* y *Lemna gibba*, conocidas por su alta capacidad de absorción de nutrientes. Estas plantas fueron empleadas para reducir las concentraciones de nitratos, fosfatos y materia orgánica presentes en el agua.

Resultados obtenidos

La implementación de estos sistemas permitió una reducción significativa de los nutrientes responsables de la eutrofización, que favoreció la recuperación del equilibrio ecológico. Como consecuencia, se registró un incremento de la biodiversidad acuática, con la reaparición de especies de peces y aves migratorias. Así mismo, mejoró la calidad del agua destinada a actividades recreativas y al abastecimiento de comunidades cercanas.

7.4. CASO APLICADO: DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA UNA COMUNIDAD RURAL

Contexto del problema

Una comunidad rural de 500 habitantes requiere un sistema de bajo costo, baja demanda energética y operación sencilla. Se evalúa un humedal subsuperficial como alternativa robusta.

Datos de entrada

- **Población:** 500 hab.
- **Dotación:** 100 L/hab·d
- **Caudal:** $Q = 500 \times 100 \text{ L/d} = 50\,000 \text{ L/d} = 50 \text{ m}^3/\text{d}$
- **DBO influente:** 200 mg/L
- **TRH deseado:** 5 días
- **Profundidad efectiva:** 0,60 m

Paso 1: Estimación del volumen hidráulico

$$V = Q \times \text{TRH} = 50 \text{ m}^3/\text{d} \times 5 \text{ d} = 250 \text{ m}^3$$

Paso 2: Estimación del área superficial

$$A = V / \text{profundidad} = 250 / 0,60 = 416,7 \text{ m}^2 (\approx 417 \text{ m}^2)$$

Paso 3: Estimación de la carga orgánica diaria

$$200 \text{ mg/L} = 0,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Carga DBO} = 50 \times 0,2 = 10 \text{ kg DBO/d}$$

Este valor es compatible con humedales, siempre que el diseño considere sustrato, flujo y vegetación adecuados.

Paso 4: Selección de especies

Phragmites australis y *Typha latifolia* aportan:

- Extensa rizosfera (microambientes aeróbicos/anóxicos).
- Soporte para *biofilm*.
- Estabilidad estructural del sistema.

El rol de la planta no es «hacer todo», sino crear condiciones para procesos microbianos y retención física.

Paso 5

El sistema es viable en terreno rural: 417 m² equivalen a ~0,042 ha, una superficie razonable.

La operación requiere mantenimiento básico (control de colmatación, cosecha periódica de biomasa, manejo de sólidos).

Conclusión del caso

El caso traduce población a caudal, caudal a volumen y volumen a área, de modo que muestra una lógica de diseño y validación con carga orgánica. Esto demuestra «pensamiento ingenieril» sin exceder el alcance del libro.



CAPÍTULO 8

INNOVACIONES BIOTECNOLÓGICAS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS

Las innovaciones biotecnológicas aplicadas al tratamiento de aguas residuales han permitido el desarrollo de sistemas sostenibles que aprovechan procesos naturales y la acción de organismos vivos para la remoción de contaminantes. Estas tecnologías buscan reducir el impacto ambiental, optimizar el uso de recursos y ofrecer soluciones adaptables a distintos contextos socioeconómicos y geográficos.

8.1. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN CON ORGANISMOS BIOLÓGICOS

Las lagunas de estabilización son sistemas naturales de tratamiento que emplean organismos biológicos, como bacterias, protozoos y microalgas, para la depuración de aguas residuales. Estos sistemas operan bajo distintas condiciones ambientales, que incluyen fases aeróbicas, anaeróbicas y facultativas, con lo que permite la degradación progresiva de la materia orgánica y la remoción de nutrientes.

En condiciones aeróbicas, los microorganismos oxidan la materia orgánica, mientras que en ambientes anaeróbicos la descomposición ocurre en ausencia de oxígeno. Gracias a esta dinámica, las lagunas de estabilización

resultan especialmente eficaces en la eliminación de nitrógeno y fósforo mediante procesos de nitrificación y desnitrificación (Álvarez & Pérez, 2021; Gómez & Sánchez, 2020).

El funcionamiento de estos sistemas es relativamente sencillo, lo que facilita su implementación en zonas rurales o en regiones con recursos energéticos limitados. La transformación de los contaminantes se produce por la acción conjunta de los microorganismos y de condiciones ambientales favorables, como la radiación solar y la temperatura. Además, la presencia de macrófitas acuáticas, como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor* (lenteja de agua), contribuye a la absorción de nutrientes y mejora la eficiencia global del tratamiento (Moreno & Díaz, 2022). Estas características hacen que las lagunas de estabilización presenten bajos costos operativos y una infraestructura mínima, convirtiéndolas en una alternativa accesible y sostenible (Lima & Sousa, 2023).

8.1.1. Lagunas aeróbicas

Las lagunas aeróbicas operan bajo condiciones de oxígeno disuelto, lo cual favorece la actividad de bacterias aeróbicas encargadas de la descomposición de la materia orgánica. En este proceso, los compuestos orgánicos son transformados principalmente en dióxido de carbono y agua.

Las microalgas presentes en estas lagunas desempeñan un papel clave, ya que mediante la fotosíntesis producen oxígeno, el cual es utilizado por las bacterias aeróbicas, de modo que se establece una relación simbiótica que incrementa la eficiencia del sistema (Álvarez & Pérez, 2021).

8.1.2. Lagunas anaeróbicas

En las lagunas anaeróbicas, las concentraciones de oxígeno son muy bajas o inexistentes. En estas condiciones, los microorganismos anaeróbicos degradan la materia orgánica mediante procesos como la metanogénesis, en los cuales se generan gases como metano y dióxido de carbono.

Este tipo de lagunas es particularmente importante para la reducción de sólidos suspendidos y para la eliminación parcial de nutrientes, especialmente en aguas residuales con altas cargas orgánicas (Moreno & Díaz, 2022).

8.1.3. Lagunas facultativas

Las lagunas facultativas combinan procesos aeróbicos y anaeróbicos. Permiten, así, que los microorganismos alternen entre ambos mecanismos según la disponibilidad de oxígeno. En las capas superficiales, donde existe oxígeno disuelto, predominan los procesos aeróbicos, mientras que en las capas más profundas se desarrollan procesos anaeróbicos debido a la limitada disponibilidad de oxígeno.

Esta versatilidad convierte a las lagunas facultativas en sistemas altamente eficientes y adaptables para el tratamiento de aguas residuales con cargas variables (Gómez & Sánchez, 2020).

Procesos complementarios en las lagunas de estabilización

Las lagunas facultativas combinan procesos aeróbicos y anaeróbicos, con lo que es posible que los microorganismos alternen entre ambos mecanismos según la disponibilidad de oxígeno. En las capas superficiales, donde existe oxígeno disuelto, predominan los procesos aeróbicos, mientras que en las capas más profundas se desarrollan procesos anaeróbicos debido a la limitada disponibilidad de oxígeno.

Esta versatilidad convierte a las lagunas facultativas en sistemas altamente eficientes y adaptables para el tratamiento de aguas residuales con cargas variables (Gómez & Sánchez, 2020).

Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización

- Ventajas

Las lagunas de estabilización presentan bajos requerimientos de mantenimiento y costos operativos reducidos. No dependen de fuentes externas de energía y poseen la capacidad de tratar grandes volúmenes de aguas residuales, lo que las hace especialmente adecuadas para comunidades rurales y zonas periurbanas.

- Desventajas

Entre sus principales limitaciones se encuentra la necesidad de grandes extensiones de terreno. Así mismo, el proceso de tratamiento puede ser lento y su eficiencia depende de factores ambientales, como la temperatura y la carga contaminante del agua influente.

8.2. FOTOBIORREACTORES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y TRATAMIENTO DE AGUAS

8.2.1. Tipos de fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados diseñados para promover la fotosíntesis de microalgas bajo condiciones controladas de luz, temperatura y pH. Estos sistemas no solo permiten la producción de biomasa con potencial aplicación en la obtención de biocombustibles y otros productos industriales, sino que también constituyen una herramienta eficaz para el tratamiento de aguas residuales (Rodríguez & López, 2021).

Las microalgas cultivadas en fotobiorreactores presentan una elevada capacidad para remover nutrientes, como nitrógeno en forma de amonio, nitratos y nitritos y fósforo, principalmente como fosfatos, los cuales son responsables de procesos de eutrofización en cuerpos de agua naturales (Sánchez & García, 2022). De este modo, los fotobiorreactores contribuyen simultáneamente a la mejora de la calidad del agua y a la valorización de los nutrientes recuperados en forma de biomasa.

Estos sistemas están diseñados para maximizar la eficiencia tanto en la captación de contaminantes como en la producción de biomasa. Entre sus principales ventajas se encuentran la reducción de la demanda de oxígeno en el efluente tratado y la posibilidad de recuperar nutrientes y carbono en forma de biomasa algal aprovechable (González & Martínez, 2020). No obstante, su implementación requiere un control riguroso de las condiciones operativas, lo que puede incrementar los costos y la complejidad del sistema (Batista & Ribeiro, 2021).

8.2.2. Fotobiorreactores de burbujeo

Los fotobiorreactores de burbujeo consisten en columnas a través de las cuales se introduce aire o dióxido de carbono con el fin de promover el crecimiento de las microalgas. Estos sistemas presentan una configuración relativamente simple y un bajo costo de operación, lo que los hace atractivos para aplicaciones a pequeña y mediana escala.

Sin embargo, la agitación generada por el burbujeo puede resultar insuficiente para garantizar una distribución homogénea de las microalgas, lo cual limita la eficiencia del cultivo en sistemas de mayor tamaño (Batista & Ribeiro, 2021).

8.2.3. Fotobiorreactores de columna vertical

Los fotobiorreactores de columna vertical emplean una disposición cilíndrica, generalmente combinada con iluminación artificial, que permite el cultivo de microalgas a mayores densidades celulares. Esta configuración incrementa la superficie de exposición a la luz, de manera que mejora la eficiencia fotosintética y, en consecuencia, la remoción de nutrientes del agua residual.

Estos sistemas son más eficientes que los fotobiorreactores de burbujeo, aunque requieren una mayor inversión inicial y un control más preciso de las condiciones operativas (Segredo-Morales et al., 2024).

8.2.4. Fotobiorreactores de membrana

Los fotobiorreactores de membrana incorporan sistemas de separación que permiten retener las microalgas dentro del reactor, facilitando su concentración y recuperación. Esta tecnología mejora la eficiencia del proceso al aumentar la densidad celular y optimizar la recuperación de nutrientes y biomasa.

Este tipo de fotobiorreactor resulta especialmente adecuado para aplicaciones en las que se busca maximizar la producción de biomasa y la calidad del effluente tratado, aunque su implementación conlleva mayores costos y requerimientos técnicos (González & Martínez, 2020).

8.3. VENTAJAS DE LOS FOTOBIORREACTORES

Desde el punto de vista biotecnológico y ambiental, los fotobiorreactores presentan múltiples ventajas. En primer lugar, destacan por su alta eficiencia en la eliminación de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, y así contribuyen a la prevención de la eutrofización. Así mismo, permiten la producción de biomasa algal con potencial uso en diversos procesos industriales, lo que favorece la valorización de residuos y la economía circular.

Adicionalmente, estos sistemas ofrecen un control preciso de las condiciones de cultivo, incluyendo la temperatura, la intensidad lumínica y el pH, lo que incrementa la estabilidad y reproducibilidad del proceso.

8.4. DESVENTAJAS

A pesar de sus ventajas, los fotobiorreactores presentan ciertas limitaciones. Entre las principales se encuentran los elevados costos iniciales asociados a la instalación, especialmente en sistemas de columna vertical y de membrana. Así mismo, requieren un monitoreo constante y personal capacitado para mantener las condiciones óptimas de operación, lo que puede incrementar los costos de mantenimiento y operación (Batista & Ribeiro, 2021).

8.5. BIOFILTROS Y BIOPELÍCULAS MICROBIANAS

Los biofiltros son sistemas de tratamiento de aguas residuales que emplean un medio filtrante colonizado por microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Estos sistemas se basan en la interacción entre el sustrato sólido, el flujo hidráulico y las comunidades microbianas adheridas, lo que permite una remoción eficiente de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como de materia orgánica disuelta y particulada.

Debido a su eficiencia, estabilidad operativa y relativa simplicidad tecnológica, los biofiltros han sido ampliamente utilizados tanto en sistemas de tratamiento municipales como industriales, con lo que han contribuido de manera significativa a la mejora de la calidad del agua tratada (Chen et al., 2022).

8.5.1. Formación y funcionamiento de las biopelículas microbianas

Las biopelículas microbianas son comunidades estructuradas de microorganismos que se adhieren a superficies sólidas mediante una matriz extracelular polimérica (EPS, por sus siglas en inglés), compuesta principalmente por polisacáridos, proteínas y ADN extracelular. Esta matriz proporciona estabilidad mecánica, protección frente a condiciones ambientales adversas y facilita la comunicación entre los microorganismos.

La formación de las biopelículas ocurre a través de varias etapas secuenciales bien definidas (López & Pérez, 2022):

1. Adhesión inicial

Microorganismos planctónicos, como *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* y *Flavobacterium sp.* se adhieren de manera reversible a la superficie del medio filtrante.

2. Formación de microcolonias

Las células adheridas comienzan a multiplicarse y a secretar exopolisacáridos, fortaleciendo la adhesión y favoreciendo la cohesión celular.

3. Maduración de la biopelícula

Se desarrolla una estructura tridimensional compleja, caracterizada por la presencia de gradientes de oxígeno y nutrientes, lo que permite la coexistencia de microorganismos aerobios, como *Nitrosomonas europaea*, y anaerobios, como *Desulfovibrio desulfuricans*.

4. Desprendimiento y diseminación

Parte de la biopelícula se desprende de la superficie, y así hace posible la colonización de nuevas áreas del sistema y asegura la continuidad del proceso biológico (Gómez & Pérez, 2021).

Este comportamiento dinámico convierte a las biopelículas en sistemas altamente eficientes y resilientes para el tratamiento biológico de aguas residuales.

8.5.2. Procesos de remoción de contaminantes en biofiltros

Los biofiltros permiten la eliminación de contaminantes mediante diversos procesos biológicos desarrollados dentro de la biopelícula:

a) Nitrificación

Nitrosomonas europaea oxida el amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-), mientras que *Nitrobacter winogradskyi* convierte los nitritos en nitratos (NO_3^-), de modo que facilita la transformación progresiva del nitrógeno amoniacal (Moreno & Hernández, 2020).

b) Desnitrificación

En condiciones anóxicas, bacterias como *Paracoccus denitrificans* y *Pseudomonas stutzeri* reducen los nitratos a gas nitrógeno (N_2), y permiten, de esta manera, la eliminación definitiva del nitrógeno del sistema acuático Liu et al., 2026).

c) Degradación de materia orgánica

Microorganismos heterótrofos, como *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter sp.* descomponen compuestos orgánicos complejos en dióxido de carbono y agua, con lo que reducen la carga orgánica del efluente tratado (Gómez & Pérez, 2021).

8.5.3. Tipos de biofiltros

Los biofiltros pueden clasificarse en función de la configuración del medio filtrante y de la dinámica del flujo hidráulico, lo que determina su desempeño y aplicaciones específicas.

a) Biofiltros de lecho fijo

Los biofiltros de lecho fijo utilizan medios sólidos como arena, grava o carbón activado, sobre los cuales se desarrollan biopelículas microbianas. El agua residual fluye a través del lecho, lo que permite el contacto entre los contaminantes y los microorganismos adheridos, que degradan principalmente materia orgánica y nutrientes (Ranadheera & Khanal, 2024).

b) Biofiltros de lecho móvil (MBBR, *Moving Bed Biofilm Reactor*)

Los biofiltros de lecho móvil emplean soportes plásticos móviles colonizados por biopelículas microbianas. Estos soportes se mantienen en constante movimiento dentro del reactor, lo que incrementa el contacto entre el agua residual y la biomasa, mejorando la eficiencia del tratamiento y reduciendo el riesgo de obstrucción del sistema (López & Pérez, 2022).

c) Biofiltros de lecho fluido

En los biofiltros de lecho fluidizado, el medio filtrante se mantiene en suspensión mediante el flujo ascendente del agua. Esta configuración maximiza la superficie de contacto entre la biopelícula y los contaminantes, lo que favorece altas tasas de remoción y una mayor eficiencia del proceso biológico (Gómez & Pérez, 2021).

8.5.4. Ventajas y limitaciones de los biofiltros

Ventajas

Los biofiltros presentan una elevada eficiencia en la eliminación de nitrógeno y materia orgánica, debido a la acción conjunta de comunidades microbianas especializadas que se desarrollan en forma de biopelículas adheridas al medio filtrante. Esta configuración favorece procesos biológicos clave, como la nitrificación, la desnitrificación y la degradación de compuestos orgánicos complejos, que permiten una mejora significativa de la calidad del effluente tratado.

Así mismo, los biofiltros se caracterizan por sus bajos costos operativos en comparación con los sistemas de tratamiento basados en procesos químicos, ya que requieren un menor consumo de reactivos y energía. Otra ventaja relevante es la menor producción de lodos en relación con los sistemas de lodos activados, lo que reduce los costos asociados a la gestión, tratamiento y disposición final de residuos. Además, estos sistemas presentan una elevada estabilidad operativa y una buena capacidad de adaptación a variaciones moderadas en la carga contaminante, lo que los convierte en una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales.

Limitaciones

A pesar de sus ventajas, los biofiltros presentan ciertas limitaciones que deben ser consideradas en su diseño y operación. Estos sistemas son sensibles a variaciones bruscas de temperatura y pH, las cuales pueden afectar negativamente la actividad metabólica de los microorganismos y, en consecuencia, la eficiencia del proceso de tratamiento. Cambios repentinos en las condiciones ambientales pueden provocar una disminución de la actividad biológica o incluso la pérdida parcial de la biomasa adherida.

Así mismo, los biofiltros requieren un mantenimiento periódico para evitar el colapso de la biopelícula, el taponamiento del medio filtrante o el desprendimiento excesivo de biomasa, fenómenos que pueden reducir la eficiencia hidráulica y biológica del sistema. Por ello, es necesario implementar programas de monitoreo y control que aseguren condiciones óptimas de operación y prolonguen la vida útil del biofiltro (López & Pérez, 2022).

8.5.5. Principales especies microbianas asociadas

a) *Nitrosomonas europaea*

Oxida el amonio a nitrito durante la nitrificación.

Condiciones óptimas: pH 7,5-8,5, 25-30 °C, oxígeno disuelto > 2 mg/L

b) *Nitrobacter winogradskyi*

Convierte nitritos en nitratos, evitando la acumulación de compuestos tóxicos.

Condiciones óptimas: ambientes aeróbicos, pH 6,5-8,5, 20-30 °C

c) *Paracoccus denitrificans*

Reduce nitratos a gas nitrógeno en ambientes anóxicos con fuente de carbono orgánico.

d) *Pseudomonas aeruginosa*

Forma biopelículas robustas y degrada compuestos orgánicos complejos, aportando estabilidad al biofiltro.

8.6. VERMIFILTROS Y LOMBRIFILTRACIÓN

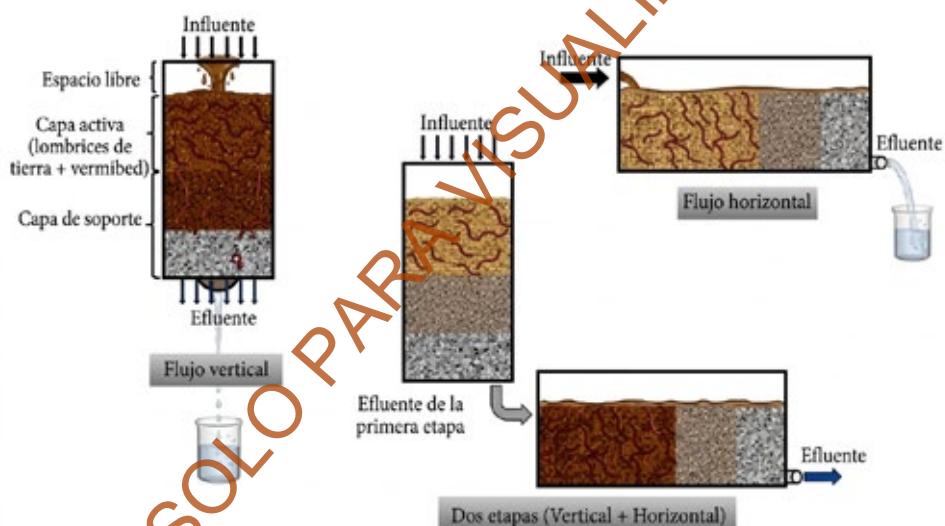
La vermifiltración es un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales que se basa en la acción conjunta de lombrices epigeas y de los microorganismos asociados a su sistema digestivo y al medio filtrante. Entre las especies más utilizadas en este tipo de sistemas destacan *Eisenia fetida* y *Eudrilus eugeniae*, debido a su elevada capacidad para procesar materia orgánica y adaptarse a diferentes condiciones ambientales.

En los vermifiltros, las lombrices actúan como agentes biológicos que fragmentan y transforman la materia orgánica presente en el agua residual, con lo que facilitan su degradación posterior por parte de comunidades microbianas. Este proceso contribuye a la reducción de la carga orgánica, la disminución de sólidos suspendidos y la mejora de la calidad del efluente tratado. Además, la actividad de las lombrices favorece la aireación del medio filtrante, lo que mejora las condiciones para el desarrollo de microorganismos aerobios y optimiza los procesos de oxidación biológica (Moreno & Hernández, 2020).

Otro aspecto relevante de la lombrifiltración es su capacidad para reducir la carga de patógenos presentes en las aguas residuales. A través de mecanismos físicos y biológicos, como la ingestión de microorganismos y la acción antimicrobiana de los compuestos presentes en el tracto digestivo de las lombrices, se logra una disminución significativa de bacterias patógenas. En conjunto, estas características convierten a los vermifiltros en una alternativa sostenible, de bajo costo y ambientalmente amigable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales, especialmente en comunidades rurales y periurbanas.

FIGURA 13.

Diagramas esquemáticos de diferentes tipos de configuraciones de vermifiltros, mostrando la organización estructural y los componentes principales empleados en su diseño y funcionamiento.



Adaptado de Saapi et al. (2024).

8.7. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS VERMIFILTROS

El vermifiltro es un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales basado en la acción combinada de lombrices y microorganismos. En este sistema, el medio filtrante está compuesto por un lecho poroso (grava, arena o compost), sobre el cual las lombrices y microorganismos asociados trabajan de manera sinérgica para descomponer la materia orgánica, reducir la carga de patógenos y mejorar la calidad del agua tratada.

El funcionamiento del vermifiltro se basa en tres procesos clave:

1. Filtración física

El medio filtrante retiene sólidos suspendidos y compuestos particulados presentes en las aguas residuales, lo que permite su eliminación mediante un proceso físico. Este paso es esencial para reducir la turbidez del agua y facilitar la acción de los microorganismos y las lombrices.

2. Biodegradación microbiana

Bacterias como *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus megaterium* descomponen la materia orgánica en compuestos más simples, como dióxido de carbono y agua. Esta descomposición contribuye a la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y mejora la calidad del efluente tratado (Hu et al., 2023).

3. Transformación por lombrices

Las lombrices, como *Eisenia fetida* y *Eudrilus eugeniae*, consumen la materia orgánica y la transforman en vermicompost y CO₂. Este proceso no solo reduce la cantidad de residuos orgánicos en el agua, sino que también produce un subproducto útil como biofertilizante (Bajpai et al., 2015).

8.9. ESPECIES DE LOMBRICES Y MICROORGANISMOS ASOCIADOS

Las lombrices empleadas en sistemas de vermifiltración corresponden principalmente a especies epigeas, las cuales habitan de forma natural en la capa superficial del suelo y presentan una elevada capacidad para consumir y transformar materia orgánica en descomposición. Estas características las convierten en organismos altamente eficientes para el tratamiento biológico de aguas residuales, especialmente aquellas con cargas orgánicas moderadas.

En los vermifiltros, las lombrices actúan de manera sinérgica con comunidades microbianas asociadas, conformando un sistema biológico complejo que integra procesos físicos, bioquímicos y microbiológicos. La ingestión de materia orgánica por parte de las lombrices facilita su fragmentación mecánica y digestión enzimática, lo cual aumenta la biodisponibilidad de los sustratos para los microorganismos. A su vez, las bacterias y actinobacterias asociadas al tracto digestivo de las

lombrices y al medio filtrante continúan los procesos de biodegradación, nitrificación y estabilización de los residuos.

Entre las especies más utilizadas en vermifiltros destacan *Eisenia fetida* y *Eudrilus eugeniae*, debido a su alta tasa reproductiva, rápida adaptación a condiciones controladas y elevada eficiencia en la transformación de materia orgánica. Estas lombrices trabajan en conjunto con microorganismos como *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* y especies del grupo *Actinobacteria*, los cuales desempeñan un rol clave en la degradación de compuestos orgánicos complejos, la reducción de la carga patógena y la mejora de la calidad del efluente tratado.

8.9.1. *Eisenia fetida* (lombriz roja californiana)

Clasificación y morfología

- **Filo:** *Annelida*
- **Clase:** *Clitellata*
- **Orden:** *Opisthopora*
- **Familia:** *Lumbricidae*
- **Género:** *Eisenia*
- **Especie:** *Eisenia fetida*

Descripción

Eisenia fetida es una lombriz de cuerpo segmentado, cilíndrico y flexible, caracterizada por una coloración rojiza con bandas amarillentas transversales. Su longitud corporal varía entre 6 y 12 cm en estado adulto, con un peso aproximado de 0,4 a 0,6 g. Presenta un clitelo bien desarrollado, indicador de madurez sexual, y una elevada movilidad, lo que favorece la aireación y estructuración del sustrato en los vermifiltros.

Ciclo de vida y reproducción

- **Madurez sexual**

Eisenia fetida alcanza la madurez sexual entre los 60 y 90 días de vida, dependiendo de las condiciones ambientales y de la disponibilidad de alimento.

- **Apareamiento**

Es una especie hermafrodita obligatoria, por lo que requiere fecundación cruzada. El apareamiento ocurre generalmente en ambientes con alta humedad y adecuada aireación, que favorecen el intercambio de material genético.

- **Producción de capullos**

Cada individuo adulto puede producir un capullo cada 7 a 10 días. Los capullos contienen los embriones protegidos por una cápsula resistente a condiciones ambientales adversas.

- **Eclosión**

El periodo de incubación varía entre 21 y 30 días, y de cada capullo emergen entre 3 y 5 lombrices juveniles.

- **Esperanza de vida**

En condiciones óptimas, la esperanza de vida de *Eisenia fetida* oscila entre 4 y 5 años.

- **Tasa reproductiva**

Una lombriz adulta puede generar entre 500 y 1500 descendientes por año, lo que asegura una rápida colonización y estabilidad poblacional en el sistema de vermifiltración.

Condiciones óptimas de crecimiento

- **Temperatura:** 15-25 °C
- **Humedad:** 60-80 %
- **pH:** 6-7
- **Oxígeno:** ambientes bien oxigenados favorecen su actividad metabólica.
- **Sustrato:** suelos ricos en materia orgánica, como estiércol estabilizado o residuos vegetales en descomposición.

Estas condiciones permiten maximizar la eficiencia de *Eisenia fetida* en la degradación de materia orgánica y la producción de vermicompost.

8.9.2. *Eudrilus eugeniae* (lombriz africana)

Clasificación y morfología

- **Filo:** *Annelida*
- **Clase:** *Clitellata*
- **Orden:** *Opisthopora*
- **Familia:** *Eudrilidae*
- **Género:** *Eudrilus*
- **Especie:** *Eudrilus eugeniae*

Descripción

Eudrilus eugeniae es una lombriz epigea de mayor tamaño que *Eisenia fetida*: alcanza longitudes de hasta 15 cm. Presenta una coloración rojiza oscura y un cuerpo más alargado y flexible. Su mayor tamaño corporal le permite consumir grandes volúmenes de materia orgánica, lo que resulta ventajoso en sistemas con cargas orgánicas elevadas.

Ciclo de vida y reproducción

- Madurez sexual

Esta especie alcanza la madurez sexual en un periodo corto, entre 35 y 40 días, lo que la convierte en una lombriz con elevada capacidad reproductiva.

- Apareamiento

Al igual que *Eisenia fetida*, es hermafrodita obligatoria y requiere fecundación cruzada. El proceso ocurre en sustratos húmedos y bien aireados.

- Producción de capullos

Eudrilus eugeniae puede producir entre 2 y 3 capullos por semana.

• Eclosión

Los capullos eclosionan en un periodo de 10 a 14 días, con lo que generan entre 2 y 3 crías por capullo.

- **Esperanza de vida**

En condiciones óptimas, su vida útil es de 3 a 4 años.

- **Tasa reproductiva**

Cada lombriz adulta puede generar hasta 1800 descendientes por año, lo que permite una rápida expansión poblacional.

Condiciones óptimas de crecimiento

- **Temperatura:** 20-30 °C
- **Humedad:** superior al 70 %
- **pH:** 6,5-7,5
- **Oxígeno:** requiere suelos bien aireados.
- **Sustrato:** prefiere residuos orgánicos con alto contenido de nitrógeno y materia orgánica fácilmente biodegradable.

8.9.3. Ventajas de la vermifiltración

La vermifiltración se caracteriza por su bajo costo operativo, ya que no requiere insumos químicos ni infraestructuras complejas, lo que la convierte en una alternativa viable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Además, estos sistemas presentan una alta eficiencia en la eliminación de DBO, DQO y nitrógeno amoniacal, lo cual mejora significativamente la calidad del effluente tratado (Moreno & Hernández, 2020).

Un beneficio adicional es la producción de vermicompost, un subproducto estabilizado y rico en nutrientes que puede ser utilizado como biofertilizante en actividades agrícolas y de restauración de suelos, para contribuir a la economía circular.

8.9.4. Desventajas de la vermifiltración

Entre las principales limitaciones de la vermifiltración se encuentra la sensibilidad de las lombrices a temperaturas extremas, ya que requieren rangos térmicos relativamente estrechos para mantener su actividad metabólica. Así mismo, el lecho filtrante puede requerir mantenimiento y reemplazo periódico para evitar la compactación del sustrato, garantizar una adecuada aireación y mantener la eficiencia hidráulica y biológica del sistema.

8.10. CASO APLICADO: APLICACIÓN DE UN VERMIFILTRO PARA AGUAS DOMÉSTICAS

Contexto del problema

Una vivienda multifamiliar busca tratar sus aguas residuales con un sistema descentralizado, de bajo consumo energético y con subproducto aprovechable (vermicompost). Se propone un vermifiltro con *Eisenia fetida*.

Datos de entrada

- **Caudal:** 5 m³/d
- **DBO influente:** 250 mg/L
- **Espesor del lecho:** 0,8 m
- **Rango térmico operativo:** 15-25 °C

Paso 1: Estimación de carga orgánica diaria (DBO)

$$250 \text{ mg/L} = 0,25 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Carga DBO} = 5 \times 0,25 = 1,25 \text{ kg DBO/d}$$

Paso 2: Desempeño esperado

Con remoción esperada del 75-85 %:

$$\text{DBO removida} = 1,25 \times 0,75 \text{ a } 0,85 = 0,94\text{-}1,06 \text{ kg/d}$$

$$\text{DBO residual aproximada} = 0,19\text{-}0,31 \text{ kg/d}$$

Paso 3: Mecanismo de acción

- La remoción no es «solo lombrices».
- La filtración física retiene sólidos.
- La formación de una biopelícula microbiana degrada materia orgánica disuelta.
- La lombriz fragmenta y airea, mejora transferencia de oxígeno y estabiliza material en vermicompost.

Esto explica por qué los vermifiltros suelen ser más estables que filtros puramente físicos.

Paso 4: Valor agregado del subproducto

La producción de vermicompost (aproximadamente 30-40 kg/mes, según el diseño del vermifiltro) se considera un subproducto de valor dentro de un modelo de economía circular, ya que permite reducir los residuos orgánicos generados por la vivienda y proporcionar un insumo agrícola reutilizable como fertilizante natural, cerrando el ciclo de aprovechamiento de recursos y fortaleciendo la sostenibilidad del sistema de tratamiento.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

CAPÍTULO 9

BIOTECNOLOGÍAS AVANZADAS Y PERSPECTIVAS FUTURAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

9.1. DESARROLLO DE NUEVOS ORGANISMOS MODIFICADOS GENÉTICAMENTE

El tratamiento de aguas residuales constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos, debido al incremento sostenido de la contaminación de origen industrial, agrícola y urbano, así como a la creciente complejidad de los contaminantes presentes en los efluentes. En este contexto, la biotecnología moderna ha impulsado el desarrollo de enfoques innovadores basados en el uso de organismos genéticamente modificados (OMG), los cuales presentan capacidades superiores de degradación y remoción de contaminantes en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.

La modificación genética de bacterias, microalgas y hongos ha permitido optimizar rutas metabólicas específicas involucradas en la degradación de compuestos orgánicos tóxicos, la bioacumulación o transformación de metales pesados y la eliminación de contaminantes emergentes, como fármacos y disruptores endocrinos. Mediante la introducción, eliminación o sobreexpresión de genes clave, estos organismos pueden exhibir mayor resistencia a condiciones ambientales adversas, tasas de

crecimiento aceleradas y una eficiencia incrementada en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales.

Los avances recientes en biología sintética y en tecnologías de edición genética, particularmente el uso de herramientas como CRISPR-Cas9, han revolucionado el diseño y la construcción de microorganismos con funciones altamente específicas y controladas. Estas herramientas permiten modificaciones genéticas precisas que reducen la incertidumbre asociada a técnicas tradicionales y facilitan el desarrollo de cepas adaptadas a contaminantes particulares o a condiciones operativas definidas (Jeong et al., 2023).

Así mismo, los organismos modificados genéticamente pueden ser integrados de manera estratégica en diferentes configuraciones de tratamiento, como biorreactores de biomasa suspendida o adherida, sistemas de fitorremediación asistida, biofiltros y fotobiorreactores. Esta versatilidad amplía su potencial de aplicación tanto en plantas de tratamiento centralizadas como en sistemas descentralizados, con lo que contribuye al desarrollo de soluciones más eficientes, sostenibles y adaptadas a las demandas futuras de la gestión del agua.

9.2. ORGANISMOS MODIFICADOS PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES ESPECÍFICOS

El desarrollo de organismos modificados genéticamente (OMG) ha permitido abordar de manera más eficiente la degradación de contaminantes específicos presentes en aguas residuales, especialmente aquellos compuestos persistentes o recalcitrantes que no son eliminados adecuadamente mediante procesos convencionales. A través de técnicas de ingeniería genética y biología sintética, se han optimizado rutas metabólicas en bacterias, hongos y microalgas, incrementando su capacidad de degradación, absorción o transformación de contaminantes complejos.

9.2.1. Bacterias modificadas genéticamente (BMG)

Las bacterias han sido ampliamente modificadas debido a su versatilidad metabólica, rápido crecimiento y facilidad de manipulación genética. Las modificaciones suelen enfocarse en la introducción o sobreexpresión de genes que codifican enzimas clave, como monooxigenasas, dioxigenasas y reductasas, responsables de la degradación de contaminantes tóxicos.

a) *Escherichia coli* modificada

Esta bacteria ha sido diseñada para metabolizar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y compuestos altamente tóxicos como el benceno y el tolueno, presentes en derrames petroleros y efluentes industriales. Las modificaciones genéticas permiten canalizar estos compuestos hacia rutas metabólicas que los transforman en sustancias menos tóxicas y más fácilmente biodegradables (Xiao et al., 2025).

b) *Pseudomonas putida* KT2440

Esta cepa modelo en biotecnología ambiental ha sido modificada genéticamente para incrementar su capacidad de degradar plaguicidas organoclorados y compuestos fenólicos altamente tóxicos. Su elevada tolerancia a ambientes contaminados y su capacidad para formar biopelículas estables la hacen especialmente adecuada para su uso en biorreactores y sistemas de biofiltración (Chen et al., 2022).

c) *Deinococcus radiodurans*

Conocida por su extraordinaria resistencia a la radiación y al estrés oxidativo, esta bacteria ha sido modificada para eliminar desechos radiactivos y metales pesados en efluentes industriales. La incorporación de genes asociados a la biosorción y reducción de metales ha ampliado su aplicación en ambientes extremos (Brim et al., 2000).

Diversos estudios han demostrado que el uso de consorcios de bacterias modificadas genéticamente en sistemas de biorreactores permite una remoción sinérgica de contaminantes que mejora la eficiencia global del tratamiento de aguas.

9.2.2. Hongos modificados genéticamente

Los hongos desempeñan un papel fundamental en la biotransformación de compuestos orgánicos complejos y recalcitrantes, debido a su capacidad para producir enzimas extracelulares de alta actividad oxidativa. La modificación genética ha permitido potenciar estos mecanismos naturales.

a) *Trametes versicolor* modificado

Se han introducido genes para aumentar la producción de enzimas ligninolíticas, como lacasas y peroxidasas, las cuales son altamente eficaces en la degradación de colorantes textiles, compuestos aromáticos y disruptores endocrinos presentes en aguas residuales (Wang et al., 2023).

b) *Aspergillus niger* modificado mediante CRISPR-Cas9

Esta especie ha sido optimizada genéticamente para mejorar su capacidad de absorción y precipitación de metales pesados, como plomo y cadmio. Estas modificaciones han incrementado su eficiencia en procesos de biorremediación de efluentes industriales (Huang et al., 2020).

Los hongos modificados genéticamente también han sido integrados en sistemas de biopelículas, donde actúan como filtros biológicos capaces de tratar aguas con altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

9.2.3. Microalgas modificadas genéticamente en el tratamiento de aguas residuales

Las microalgas son organismos altamente eficientes en la absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, por lo que contribuyen a la reducción de procesos de eutrofización. Mediante la modificación genética, se ha logrado aumentar su tasa de crecimiento y su eficiencia en la captación de contaminantes.

a) *Chlorella vulgaris* modificada

Esta microalga ha sido alterada genéticamente para absorber mayores cantidades de nitrógeno y fósforo, y así se han logrado reducciones significativas de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) en efluentes agrícolas y urbanos (Ortega et al., 2025).

b) *Synechocystis sp.* modificada

Ha sido diseñada para capturar y transformar contaminantes emergentes, como antibióticos y hormonas sintéticas, con lo que ha reducido su persistencia y toxicidad en los ecosistemas acuáticos (Yang et al., 2026).

En experiencias piloto desarrolladas en plantas de tratamiento en España, la aplicación de microalgas modificadas genéticamente ha permitido reducir de forma significativa la concentración de contaminantes farmacéuticos en el agua tratada, lo que evidencia el alto potencial de estas tecnologías para su implementación a escala real.

9.3. ORGANISMOS MODIFICADOS PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS

La contaminación de aguas por metales pesados representa uno de los problemas ambientales más críticos debido a su elevada toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas acuáticos. En este contexto, la ingeniería genética ha permitido el desarrollo de organismos modificados genéticamente con capacidades mejoradas para la captura, transformación y detoxificación de metales pesados presentes en aguas residuales industriales y mineras.

La modificación genética se ha centrado principalmente en la introducción o sobreexpresión de genes que codifican proteínas quelantes, metalotioneínas, fitoquelatinas y enzimas reductoras, las cuales facilitan la inmovilización o transformación de los metales en formas menos tóxicas y más fácilmente removibles.

9.3.1. Bacterias modificadas genéticamente para remoción de metales pesados

a) *Bacillus subtilis* con genes de fitoquelatinas

Esta bacteria ha sido modificada genéticamente para capturar y bioacumular arsénico presente en aguas contaminadas. La introducción de genes que codifican fitoquelatinas péptidos con alta afinidad por iones metálicos ha mejorado significativamente su capacidad para secuestrar arsénico en condiciones de alta carga contaminante. Estudios recientes indican que *Bacillus subtilis* modificado puede reducir la concentración de arsénico hasta en un 85 %, posicionándolo como una herramienta prometedora para la biorremediación de fuentes de agua afectadas por este metaloide (Gao et al., 2022).

b) *Escherichia coli* con genes de metilotropía

Escherichia coli ha sido modificada para transformar mercurio inorgánico en formas menos tóxicas y menos bioacumulables. Este enfoque se basa en la

introducción de genes de metilación y reducción que permiten alterar la forma química del mercurio, facilitando su eliminación del ambiente. Investigaciones recientes han reportado eficiencias de remoción cercanas al 90 % en efluentes industriales contaminados con mercurio, lo que evidencia su potencial para aplicaciones controladas en sistemas de tratamiento (Jones et al., 2023).

c) *Cupriavidus metallidurans* modificada genéticamente

Esta bacteria es ampliamente conocida por su resistencia natural a ambientes con altas concentraciones de metales pesados. Mediante la inserción de genes que aumentan la expresión de metalotioneínas, se ha logrado potenciar su capacidad de bioacumulación y precipitación de metales como plomo y cadmio. En estudios de laboratorio, *C. metallidurans* modificada ha demostrado una elevada eficiencia en la remoción de estos metales en aguas residuales industriales, incluso bajo condiciones extremas de contaminación (Wang et al., 2024).

d) *Pseudomonas fluorescens* con genes de resistencia a metales pesados

Esta especie ha sido diseñada para sobrevivir y funcionar en ambientes con altas concentraciones de zinc, cobre y níquel. A través de la manipulación genética, se han optimizado los sistemas de transporte y expulsión de iones metálicos, lo que ha facilitado su absorción y posterior eliminación. Estas características hacen de *Pseudomonas fluorescens* una bacteria especialmente adecuada para su aplicación en sistemas de biofiltración y biorreactores destinados al tratamiento de aguas industriales (Rodríguez et al., 2023).

e) *Shewanella oneidensis* modificada para la reducción de cromo hexavalente

El cromo hexavalente [Cr(VI)] es uno de los metales más tóxicos y persistentes en el medio ambiente. Mediante la modificación genética de *Shewanella oneidensis*, se ha incrementado su capacidad para reducir Cr(VI) a Cr(III), una forma considerablemente menos tóxica y menos soluble. Estudios recientes reportan eficiencias de hasta el 95 % en la eliminación de cromo hexavalente en efluentes industriales, lo que posiciona a esta bacteria como una de las más eficientes para la remediación de este contaminante específico (Liu et al., 2025).

9.3.2. Importancia y proyección de estas tecnologías

Los avances en ingeniería genética aplicados a la eliminación de metales pesados han permitido desarrollar soluciones biotecnológicas altamente específicas, eficientes y sostenibles. La utilización de organismos modificados genéticamente no solo mejora la eficiencia de los procesos de biorremediación, sino que también reduce la dependencia de tratamientos físico-químicos costosos y ambientalmente agresivos. No obstante, su aplicación a gran escala requiere una evaluación rigurosa de aspectos relacionados con bioseguridad, regulación ambiental y control de riesgos, temas que constituyen un eje clave en el desarrollo futuro de estas tecnologías.

9.4. CONSIDERACIONES ÉTICAS Y REGULATORIAS

La aplicación de organismos genéticamente modificados en el tratamiento de aguas residuales plantea importantes desafíos éticos, regulatorios y de bioseguridad, especialmente cuando estos organismos pueden interactuar directa o indirectamente con ecosistemas naturales. Debido a los posibles riesgos ambientales, varios países han establecido restricciones estrictas para el uso de OMG en entornos abiertos, priorizando su aplicación en sistemas cerrados y controlados, como biorreactores confinados y plantas de tratamiento altamente reguladas.

Desde el punto de vista regulatorio, uno de los principales objetivos es prevenir la liberación accidental de organismos modificados al medio ambiente. Para ello, se han desarrollado estrategias de bioseguridad avanzadas, como sistemas de autoeliminación genética (*kill-switch*), dependencia metabólica inducida y confinamiento físico en reactores cerrados. Estas tecnologías buscan garantizar que los OMG no sobrevivan fuera de las condiciones controladas del sistema de tratamiento, de modo que se reduce el riesgo de impactos ecológicos no deseados.

En el ámbito ético, existen preocupaciones relacionadas con la posible alteración de la biodiversidad, la transferencia horizontal de genes y el desarrollo de resistencias en microorganismos patógenos. La diseminación involuntaria de OMG podría modificar las dinámicas microbianas naturales y afectar así procesos ecológicos clave en cuerpos de agua y suelos asociados. Por ello, la evaluación de riesgos ambientales debe formar parte integral del diseño y la implementación de estas tecnologías.

Otro aspecto ético relevante es la dimensión socioeconómica del uso de OMG. La concentración de patentes y el control de estas tecnologías por parte de grandes

corporaciones podrían limitar su acceso en países en desarrollo, donde el tratamiento de aguas representa un desafío crítico para la salud pública y la sostenibilidad ambiental. En este sentido, resulta fundamental promover marcos regulatorios que fomenten la transferencia tecnológica responsable, la cooperación internacional y el acceso equitativo a soluciones biotecnológicas avanzadas.

En conjunto, el desarrollo y aplicación de organismos genéticamente modificados en el tratamiento de aguas debe sustentarse en regulaciones sólidas, evaluaciones científicas rigurosas y principios éticos claros. Solo a través de un equilibrio adecuado entre innovación tecnológica, seguridad ambiental y responsabilidad social será posible aprovechar plenamente el potencial de la biotecnología sin comprometer la integridad de los ecosistemas ni el bienestar de las comunidades humanas.

9.5. INTEGRACIÓN DE BIOTECNOLOGÍA CON NANOTECNOLOGÍA EN LA REMEDIACIÓN

La combinación de biotecnología y nanotecnología ha emergido como una estrategia innovadora y altamente eficiente para la remediación ambiental. Estas dos disciplinas, al ser integradas, potencian la capacidad de eliminación de contaminantes, al aprovechar tanto los procesos biológicos naturales como las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales. En este contexto, los principales enfoques incluyen el uso de microorganismos inmovilizados en materiales a escala nanométrica y la aplicación de nanopartículas funcionalizadas para mejorar la bioactividad en entornos contaminados (Borja-Borja et al., 2020).

9.5.1. Uso de nanomateriales en la remediación ambiental

Los avances en nanotecnología han permitido el diseño y aplicación de diversos nanomateriales que mejoran significativamente la adsorción, degradación y transformación de contaminantes. Entre los materiales más empleados se destacan:

a) Biochar derivado de residuos agrícolas

El biochar ha demostrado ser altamente eficaz en la adsorción de metales pesados y en la estabilización de suelos y aguas contaminadas. Su estructura altamente porosa favorece la retención de contaminantes y proporciona un sustrato adecuado para la colonización de microorganismos degradadores, lo que mejora la eficiencia de los procesos biológicos (Hernández-Macedo et al., 2020).

b) Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono se utilizan para incrementar la actividad enzimática de microorganismos degradadores de contaminantes orgánicos. Actúan como andamios para la inmovilización de enzimas y facilitan la transferencia electrónica en reacciones redox, con lo que mejoran la biodegradación de compuestos complejos.

c) Grafeno y óxido de grafeno

Estos materiales presentan una elevada superficie específica y una alta capacidad de adsorción, lo que los hace particularmente eficaces en la captación de contaminantes emergentes en cuerpos de agua. Además, pueden ser funcionalizados químicamente para aumentar su selectividad en la eliminación de compuestos específicos.

d) Nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI)

Las nanopartículas de hierro de valencia cero se emplean ampliamente en la degradación de hidrocarburos y solventes clorados en aguas subterráneas. Diversos estudios han reportado tasas de remoción superiores al 90 %, gracias a reacciones redox que transforman los contaminantes en productos menos tóxicos y más biodegradables.

9.5.2. Aplicación de microorganismos inmovilizados en nanomateriales

La nanotecnología ha permitido mejorar el desempeño de los microorganismos utilizados en procesos de biorremediación mediante su inmovilización sobre nanomateriales. Esta estrategia incrementa la estabilidad, viabilidad y eficiencia metabólica de los organismos, además de facilitar su recuperación y reutilización. Entre las aplicaciones más relevantes se encuentran:

a) Bacterias degradadoras de hidrocarburos

Inmovilizadas en matrices de biochar y nanotubos de carbono, estas bacterias presentan una mayor estabilidad microbiana y una biodegradación más eficiente de compuestos orgánicos complejos.

b) Hongos con capacidad de bioadsorción de metales pesados

La estabilización de hongos en nanopartículas de hierro ha permitido una mayor retención de metales tóxicos dentro de su estructura celular, con lo cual ha mejorado la eficiencia de remoción de metales pesados en aguas industriales.

c) Microalgas inmovilizadas en nanopartículas de sílice

Estas microalgas han sido utilizadas con éxito para la remoción de nutrientes y contaminantes emergentes en aguas residuales. La inmovilización mejora su crecimiento, su resistencia a condiciones adversas y su eficiencia en la depuración del agua.

9.5.3. Beneficios y desafíos de la integración biotecnológica y nanotecnológica

La combinación de biotecnología y nanotecnología en procesos de remediación ambiental ofrece múltiples beneficios, entre los que destacan:

- Mayor eficiencia en la degradación y adsorción de contaminantes.
- Incremento en la estabilidad y viabilidad de los microorganismos empleados.
- Aplicabilidad en diversas matrices ambientales, como agua, suelo y sedimentos.

No obstante, esta integración también enfrenta importantes desafíos que deben ser considerados para su implementación a gran escala:

- Toxicidad potencial de los nanomateriales, lo que exige evaluaciones ambientales rigurosas a largo plazo.
- Altos costos de producción y escalado, que limitan su aplicación masiva.
- Marco regulatorio y aceptación social, ya que se requiere legislación clara y una adecuada comunicación de riesgos y beneficios.

A pesar de estas limitaciones, la integración de la biotecnología y la nanotecnología representa una de las líneas más prometedoras para el desarrollo de soluciones avanzadas, sostenibles y de alta eficiencia en la remediación ambiental y el tratamiento de aguas.

9.6. ECONOMÍA CIRCULAR Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

La economía circular propone un cambio de paradigma en la gestión de residuos, orientado a transformar los desechos en recursos valiosos mediante procesos de reutilización, reciclaje y valorización. En este enfoque, la biotecnología desempeña un papel fundamental al permitir la conversión de subproductos industriales y agroindustriales en materiales útiles, bioenergía y compuestos de alto valor agregado, con el fin de contribuir a sistemas productivos más sostenibles y eficientes. Diversas iniciativas recientes evidencian el potencial de este modelo. Un ejemplo destacado es el proyecto CircSyst, desarrollado en la Universitat Politècnica de València, que utiliza residuos generados por la industria cervecera para la fabricación de mobiliario urbano y materiales de uso industrial. Esta propuesta demuestra cómo los residuos pueden reincorporarse a la cadena productiva al reducir significativamente la generación de desechos y el impacto ambiental en sectores de alto consumo de recursos (Cadena SER, 2025).

Otro caso innovador corresponde a un método desarrollado en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, que permite la recuperación de oro a partir de residuos electrónicos mediante una esponja de fibrillas de proteína. Esta técnica representa un avance relevante en la minería urbana, ya que posibilita la recuperación de metales preciosos sin recurrir a procesos altamente contaminantes ni energéticamente intensivos.

9.6.1. Estrategias biotecnológicas para el aprovechamiento de subproductos

El aprovechamiento de subproductos en el marco de la economía circular ha impulsado el desarrollo de diversas aplicaciones biotecnológicas orientadas a reducir el desperdicio y generar valor agregado. Entre las estrategias más relevantes se encuentran:

- Producción de bioplásticos

Residuos agroindustriales como el bagazo de caña de azúcar, el almidón de papa y las cáscaras de frutas han sido utilizados para la síntesis de biopolímeros biodegradables, de modo que se han constituido en una alternativa sostenible para los plásticos derivados del petróleo (González-Hernández et al., 2022).

- Biorremediación de suelos y aguas

Subproductos de la industria alimentaria, como residuos de café y cáscaras de plátano, han demostrado eficacia en la remoción de metales pesados y contaminantes emergentes presentes en suelos y cuerpos de agua, gracias a sus propiedades de bioadsorción y su interacción con microorganismos degradadores (Torres Cárdenas et al., 2023).

- Producción de biocombustibles y biohidrógeno

La conversión de residuos lignocelulósicos mediante procesos de fermentación microbiana ha mostrado un alto potencial para la producción de bioetanol y biohidrógeno, al promover la transición hacia fuentes de energía renovable y reducir la dependencia de combustibles fósiles (López Martínez et al., 2024).

En conjunto, estas estrategias consolidan a la economía circular como una alternativa viable para el manejo sostenible de residuos, pues integran la biotecnología como un eje clave en la generación de soluciones ambientales y productivas.

9.7. DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN A GRAN ESCALA

A pesar de los avances significativos en la integración de la biotecnología, la nanotecnología y la economía circular en la remediación ambiental, la implementación de estas soluciones a gran escala enfrenta diversos desafíos de carácter técnico, económico y regulatorio.

Uno de los principales obstáculos es la dificultad para producir nanomateriales a escala industrial con costos competitivos. Materiales como el grafeno y los nanotubos de carbono presentan propiedades excepcionales para la descontaminación ambiental; sin embargo, sus procesos de síntesis continúan siendo costosos y altamente demandantes en términos energéticos (Borja-Borja et al., 2020).

Así mismo, la evaluación de los impactos ambientales y toxicológicos asociados al uso de nanomateriales sigue siendo un campo en desarrollo. La posible acumulación de nanopartículas en los ecosistemas podría generar efectos adversos sobre la biodiversidad y la salud humana, lo que hace imprescindible el establecimiento de regulaciones estrictas, estudios de riesgo ambiental y protocolos de monitoreo a largo plazo (Estupiñán Vera et al., 2025).

Finalmente, la aceptación social y la adopción industrial de estas tecnologías dependen en gran medida del respaldo institucional, político y financiero. La implementación exitosa requiere incentivos económicos, marcos normativos claros y el fortalecimiento de la investigación aplicada, de modo que estas soluciones puedan ser transferidas eficazmente al mercado y contribuir al desarrollo sostenible a nivel global (Urbaser, 2025).

9.8. BIORREMEDIACIÓN APLICADA A DESASTRES AMBIENTALES: EL CASO DE LOS DERRAMES DE HIDROCARBUROS

9.8.1. Contexto y magnitud de los derrames de hidrocarburos

Los derrames de hidrocarburos constituyen uno de los desastres ambientales más severos que afectan a ecosistemas acuáticos y terrestres. Estos eventos pueden originarse por fallas en oleoductos, accidentes durante el transporte marítimo, operaciones de perforación petrolera o manejo inadecuado de combustibles. La liberación masiva de petróleo crudo y sus derivados genera impactos inmediatos y de largo plazo sobre la calidad del agua, los sedimentos, la biota acuática y las actividades humanas asociadas a estos ecosistemas (Rasheed et al., 2019).

Los hidrocarburos presentes en los derrames incluyen fracciones alifáticas, aromáticas, resinas y asfaltenos, muchas de las cuales presentan alta persistencia ambiental y toxicidad. En particular, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son reconocidos por su carácter mutagénico y carcinogénico, lo que incrementa la urgencia de aplicar estrategias de remediación eficaces y sostenibles (Sharma et al., 2020).

9.8.2. Principios biotecnológicos de la biorremediación en derrames petroleros

La biorremediación se sustenta en la capacidad metabólica de ciertos microorganismos para utilizar los hidrocarburos como fuente de carbono y energía, transformándolos en compuestos menos tóxicos como dióxido de carbono, agua y biomasa celular. A diferencia de los métodos físicos y químicos, esta estrategia busca la eliminación real del contaminante, y no solo su desplazamiento o dispersión en el ambiente (Singh et al., 2022).

Las principales estrategias biotecnológicas empleadas en derrames de hidrocarburos son:

- **Bioestimulación:** consiste en la adición de nutrientes limitantes (nitrógeno y fósforo) para potenciar la actividad de los microorganismos autóctonos.
- **Bioaumentación:** basada en la incorporación de cepas o consorcios microbianos especializados.
- **Biorremediación asistida:** combina técnicas biológicas con métodos físicos como aireación, mezcla o encapsulamiento del contaminante.

Estas estrategias suelen aplicarse de manera complementaria, dependiendo de las condiciones del sitio afectado y del tipo de hidrocarburo derramado.

9.8.3. Microorganismos clave en la degradación de hidrocarburos

Diversos estudios han identificado microorganismos con alta eficiencia en la biodegradación de hidrocarburos. Entre los géneros bacterianos más relevantes se encuentran *Pseudomonas*, *Alcanivorax*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter* y *Shewanella*, los cuales poseen rutas metabólicas específicas para la oxidación de alcanos y compuestos aromáticos (Rodríguez-Couto & Rodríguez, 2020).

Así mismo, los hongos filamentosos desempeñan un papel importante en la degradación de fracciones más complejas del petróleo. Especies como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* producen enzimas ligninolíticas capaces de oxidar compuestos aromáticos de alto peso molecular, complementando la acción bacteriana (Negi & Das, 2023).

En ambientes acuáticos, las microalgas también contribuyen indirectamente a la biorremediación, ya que incrementan la disponibilidad de oxígeno mediante la fotosíntesis y favorecen el crecimiento de bacterias aerobias degradadoras de hidrocarburos (Kumar & Shukla, 2023).

9.8.4. Condiciones de proceso y razonamiento aplicado

La eficiencia de la biorremediación en derrames de hidrocarburos depende de múltiples factores ambientales. La disponibilidad de oxígeno es crítica para los procesos aerobios, mientras que la temperatura influye directamente en la actividad enzimática microbiana. En general, las tasas de biodegradación aumentan significativamente en rangos de temperatura entre 20 y 35 °C (Singh et al., 2020). Desde un enfoque cuantitativo simplificado, considérese un cuerpo de agua

afectado por un derrame con una concentración inicial de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) de 1000 mg/L. Bajo condiciones óptimas de bioestimulación, estudios de campo reportan tasas de remoción del 60 al 80 % en periodos de 2 a 4 meses. Si se asume una eficiencia conservadora del 70 %, la concentración final de TPH se reduciría a aproximadamente 300 mg/L, lo que representa una disminución significativa del riesgo ecotoxicológico.

Este tipo de estimación, aunque preliminar, permite evaluar la viabilidad del proceso y definir estrategias de monitoreo ambiental a mediano plazo.

9.8.5. Limitaciones, desafíos y enfoque integral

A pesar de sus ventajas, la biorremediación presenta limitaciones importantes en escenarios de desastre ambiental. Los tiempos de tratamiento suelen ser prolongados, la eficiencia puede verse afectada por la heterogeneidad del sitio contaminado y es necesario un seguimiento continuo para evitar la acumulación de subproductos intermedios potencialmente tóxicos (Vymazal, 2022).

Por ello, la biorremediación no debe considerarse una solución aislada, sino parte de un enfoque integral de gestión del desastre, que incluya acciones de contención inicial, recuperación física del contaminante, tratamiento biológico y restauración ecológica. En este sentido, la biotecnología se consolida como una herramienta clave para enfrentar no solo el tratamiento rutinario de aguas, sino también la mitigación de impactos ambientales extremos.



ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A. & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257-275.
- Ahmed, M. B. Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W. & Johir, M. A. H. (2015). Understanding the interactions between trace organic contaminants and membranes in water and wastewater treatment: A review. *Journal of Membrane Science*, 478, 129-141.
- Ali, R. & Hamid, A. (2021). Ecological role of fungi in the degradation of xenobiotics: A case study on *Ganoderma lucidum* for industrial wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 49, 107742.
- Almeida, F. T. et al. (2024). Fitorremediación de metales pesados con *Pistia stratiotes*. *Ecological Engineering*, 203, 104682.
- Álvarez, F. & Pérez, J. (2021). Sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizando lagunas de estabilización. *Journal of Environmental Biotechnology*, 12(2), 55-65.
- Baig, M. I. & Khan, M. (2021). Fungal biosorption of heavy metals from industrial effluents: A review on *Aspergillus niger*. *Science Progress*, 104(3), 005685042110175.
- Bajpai, R. K., Azeez, P. A. & Sharma, A. (2015). *A comparative study on vermifiltration using epigeic earthworm Eisenia fetida and Eudrilus eugeniae for domestic wastewater treatment*. Desalination and Water Treatment.
- Batista, R. & Ribeiro, L. (2021). Fotobiorreactores de membrana: avances y aplicaciones en la remoción de nutrientes de aguas residuales. *Water Research*, 176, 115684.
- Boretti, A. & Rosa, L. (2021). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *Science of the Total Environment*, 767, 144691.

- Borja-Borja, J. M., Heredia-Moyano, S. F. & Sáez-Paguay, M. Á. (2020). Los nanomateriales y sus aplicaciones en la remediación ambiental. *Polo del Conocimiento*, 5(7), 112-130.
- Bortoluzzi, J. L., Barbosa, D. M. & Ferreira, L. F. (2020). Fungal bioremediation of industrial effluents: Efficiency of *Trametes versicolor* in the degradation of azo dyes. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101113.
- Brim, H., McFarlan, S. C., Fredrickson, J. K., Minton, K. W., Zhai, M., Wackett, L. P. & Daly, M. J. (2000). Engineering *Deinococcus radiodurans* for metal remediation in radioactive mixed waste environments. *Nature Biotechnology*.
- Campana Chávez, J. A. (2023). *Análisis de la eficiencia de la fitorremediación con Myriophyllum aquaticum en el tratamiento de aguas contaminadas* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Universidad Continental.
- Cadena SER. (2025). *El proyecto CircSyst reutiliza residuos de cerveza para fabricar mobiliario urbano*. Cadena SER.
- Chen, P., Chen, D., Zhao, W. & Zheng, X. (2022). Aeration biofilter filler screening and experimental research on nitrogen and phosphorus purification in rural black water. *Water*, 14(6), 957.
- Chen, J. et al. (2022). Genetic enhancement of *Pseudomonas putida* for degradation of organochlorine pesticides in wastewater. *Journal of Environmental Biotechnology*, 67(4), 345-357.
- Chisti, Y. (2021). Microalgae for biofuels and biomass production. *Biotechnology Advances*, 39(3), 107312.
- Dai, C., Zhang, G., Lin, W. & Luo, J. (2024). *Thiobacillus sedimenti* sp. nov., a chemolithoautotrophic sulphur oxidizing bacterium isolated from freshwater sediment.
- Das, N. & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International*, 941810.
- Deago, E. et al. (2024). Fitorremediación y biogás: un enfoque integral para la sostenibilidad del agua. *I+D Tecnológico*, 20(2), 43-53.
- De la Torre, G. E. et al. (2021). Impacto de los microplásticos en ecosistemas acuáticos. *Environmental Research*, 195, 110812.

- De la Vega Quintero, J. C., Núñez Pérez, J., Lara Fiallos, M., Barba, P., Burbano García, J. L. & Espín Valladares, R. (2025). Advances and challenges in anaerobic digestion for biogas production: Policy, technological, and microbial perspectives.
- De la Vega, C., Pérez, M. & Jiménez, A. (2022). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante el uso de *Spirulina platensis*. *Environmental Research*, 215, 113743.
- Delgado Pineda, D., Flores Guetti, M. Y., Rosado-Espinoza, X., Ahmed, M. A., Colina Andrade, G. J. & Terán Hilaes, R. (2025). Integrated approach for wastewater remediation and biofertilizer development using *Chlorella vulgaris* in raceway ponds. *Algal Research*, 85, 104022.
- Dillon, P., et al. (2009). *Managed aquifer recharge: An introduction*. Waterlines Report Series.
- Du Plessis, A. (2022). Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions. *One Earth*, 5(2), 129-131. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.004>
- Duran Mera, B. E. & Lino García, M. J. (2023). Fitorremediación con *Eichhornia crassipes* en aguas residuales. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*.
- Environmental Protection Agency. (2025). *Wastewater contaminants research*. U.S. Environmental Protection Agency (Documento institucional; URL se mantiene solo si se incluye al final del manuscrito).
- Estupiñán Vera, G. E., Jaramillo Morales, C. G. & Pérez Pérez, C. J. (2025). Estudios de nuevas tecnologías para una gestión sostenible en los procesos de purificación del agua. *RECIMUNDO*, 9(1), 308-314.
- Famiglietti, J. (2021). Groundwater depletion in the twenty-first century: A global challenge. *Nature Climate Change*, 11(3), 225-230. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01056-8>
- FAO. (2023). *Water for sustainable food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández, L. & Ruiz, M. (2022). Eficiencia de los sistemas de filtración avanzada en la eliminación de contaminantes en aguas residuales. *Journal of Environmental Engineering*, 148(6), 04022045.
- Fernández-Gómez, R. et al. (2023). Eficiencia de la rizofiltración con *Eichhornia crassipes* en aguas contaminadas con plomo y cadmio. *Environmental Pollution*, 314, 120942.

- Fernández, J., Ramírez, P. & Torres, A. (2023). Evaluación de contaminantes emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Journal of Environmental Science*, 45(2), 123-135.
- Fernández, L. et al. (2023). Microplastic pollution and its implications for aquatic biodiversity. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114725.
- Fernández, L. & Martínez, A. (2024). Advances in microalgae-based wastewater treatment systems. *Journal of Environmental Biotechnology*, 45(3), 211-225.
- Ferrero, E., Kumar, R. & Yeole, N. (2020). Utilización de un biorreactor con membranas sumergidas para el tratamiento de aguas residuales hospitalarias. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 945-956.
- Ferrera, E., et al. (2024). Resources recovery from domestic wastewater by a combined process: anaerobic digestion and membrane photobioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Water reuse is a crucial factor to implement a sustainable management of the water cycle.
- Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU: Application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116-140.
- Gao, W. et al. (2022). Genetically engineered *Bacillus subtilis* for arsenic bioaccumulation in contaminated water. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127153.
- García, L., Fernández, J. & Martínez, A. (2024). Advances in microalgae-based wastewater treatment systems. *Journal of Environmental Biotechnology*, 45(3), 211-225. (Nota: mismo título que Fernández & Martínez, 2024).
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P. & van Beek, L. P. H. (2022). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature Geoscience*, 15(5), 303-310. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00875-z>
- Gleick, P. H. (2020). *The world's water: The biennial report on freshwater resources*. Island Press.
- Gleick, P. H. (2024). *The world's water: The biennial report on freshwater resources*. Island Press.

- Gómez, M. & Sánchez, T. (2020). Eficiencia de las lagunas de estabilización en la eliminación de nutrientes en aguas residuales. *Environmental Engineering Journal*, 34(3), 45-56.
- Gómez, J. et al. (2023). Eficiencia de los sistemas de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales urbanas. *Water Research*, 215, 118278.
- Gómez, M. & Pérez, R. (2021). Desempeño de biofiltros en el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Environmental Biotechnology Journal*, 22(5), 332-343.
- Gómez, M., Rodríguez, C. & Herrera, L. (2023). Gestión de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales: desafíos y soluciones sostenibles. *Water Research Journal*, 39(4), 215-229.
- González, P. & Martínez, L. (2020). Optimización de fotobiorreactores para el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles. *Biotechnology Advances*, 38(6), 107493.
- González-Hernández, J. L. et al. (2022). Biopolímeros obtenidos a partir de residuos agroindustriales: avances y aplicaciones. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131102.
- González-Peña, S. et al. (2024). Eutrophication and its effects on freshwater ecosystems. *Water Research*, 229, 119412.
- Gupta, R. & Jain, R. (2020). Microbial degradation of pharmaceutical pollutants in aquatic environments: Focus on fungal systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110237.
- Hanotu, J., Bandulasena, H. C. H. & Zimmerman, W. B. (2012). Microflotation performance for algal separation. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(7), 1663-1673.
- Hartl, M., Torres, J. & Li, X. (2022). Avances en biorreactores de lecho fijo y su aplicación en la eliminación de compuestos orgánicos persistentes. *Journal of Water Treatment*, 45(3), 321-337.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A. & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design*. IWA Publishing.
- Hernández, M., López, E. & Rivera, P. (2020). Bioremediation of textile effluent using *Pleurotus ostreatus*: Enzyme activity and dye degradation. *Bioresource Technology*, 312, 123573.

- Hernández, P., Wang, T. & Zhao, L. (2021). Optimización de reactores anaeróbicos UASB en la industria láctea. *Environmental Biotechnology Journal*, 22(2), 89-103.
- Hernández, R., Pérez, C. & González, D. (2021). Phytoremediation potential of aquatic plants in heavy metal removal from wastewater. *Ecological Engineering*, 178, 115130.
- Hernández-Macedo, M. L., Rodríguez, J. A., Barrios Eguiluz, K. I. & Salazar-Banda, G. R. (2020). Biotecnología ambiental: desafíos y perspectivas en la aplicación de tecnologías combinadas para mejorar la remediación y la generación. *Revista Peruana de Biología*, 27(1), 43-48.
- Huang, W., Zhang, J. & Xu, L. (2020). Thin-film photobioreactors for large-scale microalgae cultivation. *Bioresource Technology*, 304, 122941.
- Hoekstra, A. Y. & Hung, P. Q. (2002). *Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*. UNESCO-IHE.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jiménez, M. E., Rodríguez, S. & Pérez, A. (2021). Biodegradation of pharmaceutical contaminants in wastewater using *Phanerochaete chrysosporium*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(4), 4156-4168.
- Jones, M. L., Thompson, R. J. & Wang, P. (2023). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for enhanced mercury detoxification via methylation pathways. *Journal of Environmental Biotechnology*, 78(4), 567-579.
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., ... Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39-46.
- Kafle, A. (2022). Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and chemical methods for phytoremediation. *Current Opinion in Environmental Science & Health*.
- Khalid, M. & Abdollahi, M. (2021). Environmental distribution of personal care products and their effects on human health. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 20(1), 1-14.

- Klink, A. (2017). A comparison of trace metal bioaccumulation and distribution in *Typha latifolia* and *Phragmites australis*: Implication for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8135-6>
- Kumar, S. & Verma, P. (2021). Bioremediation strategies for organic pollutants in wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(6), 245–261.
- Kumar, N. & Shukla, P. (2023). Microalgal-based bioremediation of emerging contaminants: Mechanisms and challenges. *Environmental Pollution*, 337, 122591.
- Kundzewicz, Z. W., Huang, J., Pinskiwar, I. & Stoffel, M. (2022). Hydrological extremes and human security. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(4), 256–271.
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J. & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199.
- Li, T., Zheng, Y., Yu, L. & Chen, S. (2019). Mixotrophic cultivation of microalgae for nutrient removal from wastewater: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 273–284.
- Li, X., Zhou, Y. & Wang, H. (2022). Biofiltration systems for wastewater treatment: Efficiency and optimization. *Water Research*, 189, 104856.
- Li, Y., Xu, J. & Zhang, Y. (2023). Evaluation of filtration techniques for microalgae harvesting. *Journal of Applied Phycology*, 35(5), 1507–1518.
- Lima, J. & Sousa, M. (2023). Evaluación de la eficiencia de las lagunas de estabilización en la remoción de nutrientes en aguas residuales urbanas. *Water Research*, 45(6), 1278–1288.
- Liu, L., Zhang, Y. & Zhang, Q. (2021). Application of *Ganoderma lucidum* for the treatment of industrial effluents: Removal of heavy metals and organic pollutants. *Journal of Environmental Management*, 280, 111681.
- Liu, D., Chang, X. & Yang, J. (2025). CRISPR-based enhancement of *Shewanella oneidensis* for chromium (VI) reduction in industrial wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 437, 129876.
- Liu, S., Zhao, X., Wang, A., Guo, H., Nie, X., Sun, M., Li, Y., Ma, Y. (2026). Nitrogen removal characteristics and underlying mechanisms by a heterotrophic nitrification–aerobic denitrification *Pseudomonas stutzeri* strain 4-3. *Microbiology Journal of Applied Microbiology*, 137(2)

- López, C. & Pérez, J. (2022). Microorganismos en biopelículas: tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales. *Journal of Environmental Processes*, 29(4), 402-415.
- López, L. P., Gómez, A. M. & Sánchez, D. C. (2022). Optimization of photobioreactor systems for high-density microalgae culture. *Journal of Applied Phycology*, 35(3), 703-715.
- López, R., Pérez, D. & Vargas, E. (2024). Optimización de costos en tratamientos físico-químicos de aguas residuales urbanas. *Environmental Engineering Review*, 50(1), 78-92.
- López, A. & Martínez, R. (2024). Avances en tratamientos terciarios para la reutilización de aguas residuales. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102967.
- López, A. & Ramírez, M. (2022). Air pollution and public health risks. *Journal of Environmental Health*, 85(3), 245-259.
- Luna-Pabello, V. M. & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17(1), 32-55.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M. & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.).
- Malla, F. A., Tamana, M., Rahman, F., Malla, A. A., Bandh, S. A., Sofi, N. A., Ahmed, M. & Rashid, S. (2024). Strategies for the reduction of water footprints. En *Current directions in water scarcity research* (vol. 8, pp. 187-201). Elsevier.
- Martínez-Huitle, C. A. & Brillas, E. (2009). *Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review* Applied Catalysis B: Environmental.
- Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Macé, S. & Astals, S. (2021). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(1), 36-45.
- Mateo-Sagasta, J. (2017). *Water pollution from agriculture: A global review*. FAO and IWMI. <https://www.fao.org/3/i7753e/i7753e.pdf>
- Mendoza, S., Gutiérrez, F. & Sánchez, J. (2021). Impacto de los subproductos de la cloración en la calidad del agua potable. *International Journal of Water Treatment*, 37(3), 144-157.

- Metcalf & Eddy. (2020). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Moreno, A. & Hernández, L. (2020). Vermifiltration in wastewater treatment: An ecological approach. *Wastewater Treatment Journal*, 15(3), 213-222.
- Moreno, L. & Díaz, S. (2022). El papel de las macrófitas en las lagunas de estabilización para la mejora del tratamiento de aguas residuales. *Aquatic Plants Journal*, 23(4), 231-242.
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. & Jeppesen, E. (2022). Climate change and the future of freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 28(6), 1756-1775.
- Negi, B. B. & Das, C. (2023). Mycoremediation of wastewater, challenges, and current status: A review. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101409.
- Ortega Blas, F. M., Ramos Saravia, J. C. & Cossio Rodríguez, P. L. (2025). Removal of nitrogen and phosphorus from municipal wastewater through cultivation of microalgae *Chlorella* sp. in consortium.
- Pacheco, A. et al. (2024). Urban waste management in developing countries. *Waste Management*, 157, 123419.
- Panizza, M. & Cerisola, G. (2009). Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants. *Chemical Reviews*, 109(12), 6541-6569.
- Pérez, F. et al. (2024). Optimización del reactor de lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales industriales. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 100973.
- Ramírez-Coutiño, M., González, L. & Torres, J. (2020). Evaluación de la eficiencia de *Scenedesmus obliquus* en la eliminación de colorantes textiles. *Journal of Environmental Management*, 265, 110547.
- Ranadheera, R. & Khanal, S. (2024). Biofiltration for low carbon rural wastewater treatment: A review of advancements and opportunities towards carbon neutrality. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Rani, M. & Mehta, P. (2021). Bioremediation of heavy metals and organic pollutants in wastewater using *Aspergillus niger*: Prospects and challenges. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101412.
- Rasheed, T., Bilal, M., Nabeel, F., Adeel, M. & Iqbal, H. M. N. (2019). Environmentally-related contaminants of high concern: Potential sources and analytical modalities for detection, quantification, and treatment.

- Environment International*, 122, 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.038>
- Rittmann, B. E. & McCarty, P. L. (2021). *Environmental biotechnology: Principles and applications*. (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Rivera Intrigo, L. M. et al. (2021). Eficiencia fitorremediadora de *Azolla* spp. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(1), 144-150.
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Dijkstra, H. & Ríos Mendoza, L. (2023). Anthropogenic pollution and its impact on aquatic biodiversity. *Environmental Science & Technology*, 57(1), 35-52.
- Rocco, D. H. E., Freire, B. M., Oliveira, T. J., et al. (2024). *Bacillus subtilis* as an effective tool for bioremediation of lead, copper and cadmium in water. *Discovery Applied Sciences*.
- Rodríguez, L. & Paredes, M. (2021). Impact of illegal gold mining on water quality and biodiversity in the Amazon region. *Science of the Total Environment*.
- Rodríguez, C. M., González, E. R. & Pérez, L. J. (2023). Enhancing pseudomonas fluorescens for multi-metal bioremediation through genetic modifications. *Environmental Biotechnology Reports*.
- Rodríguez-Couto, S. & Rodríguez, J. (2020). Advances in fungal bioremediation of organic pollutants in wastewater. *Science of the Total Environment*, 745, 141113.
- Rodríguez, M. & Torres, F. (2023). Membrane bioreactors for advanced wastewater treatment: A review of recent applications. *Environmental Science & Technology*, 57(8), 4023-4035.
- Rodríguez, P. & Ramírez, O. (2025). Consumo energético en procesos de electrocoagulación para la eliminación de metales pesados. *Energy & Water Technology*, 52(2), 112-127.
- Rodríguez, R. & López, M. (2021). Fotobiorreactores para el tratamiento de aguas residuales: avances y aplicaciones. *Journal of Water Treatment*, 14(4), 100-112.
- Saapi, S. S. Y., Andrianisa, H. A., Zorom, M., Mounirou, L. A., Kouassi, H. A. A. & Ahossouhe, M. S. (2024). New developments on vermifiltration as a bio-ecological wastewater treatment technology: Mechanism, application, performance, modelling, optimization, and sustainability. *Heliyon*, 10(8), e8267. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e8267>

- Sánchez, R. & García, A. (2022). Aplicaciones de fotobiorreactores para la producción de biomasa y tratamiento de aguas residuales. *Journal of Biotechnological Engineering*, 17(2), 79-89.
- Sánchez-Espínola, M., García-López, A. & Torres-Sánchez, R. (2023). Environmental impacts of acid mine drainage and heavy metals on aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Management*.
- Sánchez, T. & Vargas, L. (2024). Uso de tecnologías avanzadas para la eliminación de subproductos tóxicos en la desinfección del agua. *Journal of Sustainable Water Treatment*, 48(5), 191-205.
- Sharma, R. S., Rana, A. & Panthari, D. (2020). Wastewater pollution induced detrimental impacts on aquatic biodiversity: A review. En *Advances in environmental pollution management: Wastewater impacts and treatment technologies* (pp. 113-127).
- Sharma, S. & Arora, D. S. (2020). *Bioremediation of toxic contaminants from industrial wastewater using fungal species*. Environmental Technology & Innovation.
- Segredo Morales, E., González, E., González Martín, C. & Vera, L. M. (2024). Novel vertical upflow multi column configured membrane photobioreactor with a filtration control system for outdoor microalgae bacteria cultivation, harvesting and wastewater reclamation. *Chemical Engineering Journal*.
- Shakya, M., Lo, C. C. & Chain, P. S. G. (2019). Advances and challenges in metatranscriptomic analysis. *Frontiers in Genetics*, 10, 904.
- Singh, J. & Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Singh, D., Goswami, R. K., Agrawal, K., Chaturvedi, V. & Verma, P. (2022). Bio-inspired remediation of wastewater: A contemporary approach for environmental clean-up. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100261.
- Singh, R., Patel, R. & Ward, O. P. (2020). Microbial degradation of pollutants in wastewater treatment systems. *Biodegradation*, 31(2), 99-112.
- Singh, S. & Prerna, P. (2023). *Bioremediation and biotechnology: Sustainable approaches to pollution degradation*. Springer.

- Sun, W., Hu, C., Wu, J., Wei, M., Lin, J.-G. & Hong, Y. (2024). Efficient nitrogen removal via simultaneous ammonium assimilation and heterotrophic denitrification of *Paracoccus denitrificans*.
- Sasmaz Kislioglu, M. (2023). *Removal of Ag, Au, and As from Acid Mine Water Using Lemna gibba and Lemna minor—A Performance Analysis*.
- Talukdar, A., Kundu, P., Bhattacharya, S. & Dutta, N. (2024). Microplastic contamination in wastewater: Sources, distribution, detection and remediation through physical and chemical-biological methods. *Science of the Total Environment*, 916, 170254.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R. & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. McGraw-Hill.
- The Open University. (s. f.). *Wastewater treatment*. <https://www.open.edu/openlearn/>
- Torres, E. & Gutiérrez, H. (2024). Remoción de fármacos en aguas residuales mediante procesos físico-químicos: estado del arte y perspectivas futuras. *Environmental Health Journal*, 46(1), 66-81.
- UNESCO. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing water*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2023). *United Nations World Water Development Report*. UNESCO Publishing.
- Urbaser. (2025). *Innovación tecnológica y sostenibilidad en la gestión del agua. (Informe institucional)*.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163-1172.
- Vymazal, J. (2022). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 6432-6443.
- Wagner, M., Loy, A., Nogueira, R., Purkhold, U., Lee, N. & Daims, H. (2023). Microbial ecology of the nitrogen cycle. *Environmental Microbiology*, 23(1), 1-10.
- Wang, C., Chen, M. & Wang, Z. (2023). Comparative study of open ponds and closed photobioreactors for the large-scale production of microalgal biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 155, 111879.
- Wang, F., Yu, X., Yu, Z., Cui, Y., Xu, L., Huo, S., Ding, Z., Zhao, L., Du, L. & Qiu, Y. (2023). Improved laccase production by *Trametes versicolor* using Copper Glycyl L Histidyl L Lysine as a novel and high efficient inducer. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*.

- Wang, H., Liu, Y. & Zhao, F. (2024). Advances in *Cupriavidus metallidurans* engineering for heavy metal bioremediation: Genetic modifications and practical applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(2), 321-334.
- Wang, T. & Zhao, L. (2024). Tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales mediante bioreactores de membrana. *Journal of Environmental Engineering*, 51(2), 88-102.
- Weis, J. S., & Alava, J. J. (2023). (Micro)plastics are toxic pollutants. *Toxics*, 11(11), 935.
- WHO. (2024). *Progress on household drinking water, sanitation, and hygiene*. World Health Organization.
- Wu, J., Wang, X., Fu, Y., Yu, Z. & Meng, F. (2025). Recruiting high-efficiency denitrifying consortia using *Pseudomonas aeruginosa*. *Water Research*, 277, 123303.
- Xiao, et al. (2025). Development of «environmentally friendly» super *Escherichia coli* strains that can completely biodegrade toluene. *Chemical Engineering Journal*.
- Xie, J., Xu, Y., Li, Y. & Zhang, Y. (2021). Recent advancements in microalgal cultivation and harvesting methods for biofuel production. *Bioresource Technology*, 331, 125028.
- Xie, Y., Zhang, L. & Wang, H. (2021). Microalgae-based wastewater treatment: Recent advances and future perspectives. *Bioresource Technology*, 337, 125439.
- Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X. R. & Liu, C. Z. (2021). *Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities*.
- Yang, Y., Zheng, G., Gao, L., Jiang, X., Xu, J., Zhang, W., Peng, Y., Han, J., Sun, M., Ma, W. & Shi, W. (2026). *Genetic engineering to improve resistance against heavy metal stress in Synechocystis sp.*
- Zhang, C., Li, Y., Wang, C., Niu, L. & Cai, W. (2022). Water pollution and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 7652-7663.
- Zhang, Y., Chen, W. & Liu, T. (2023). Bioremediation of emerging contaminants using engineered bacterial strains. *Environmental Microbiology Reports*, 15(4), 567-582.
- Zhou, Y., Gao, W. & Rodríguez, M. (2022). Uso de bioreactores de lecho móvil en la reducción de DQO en aguas residuales industriales. *Applied Microbiology Reports*, 19(1), 233-247.



ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Adsorción	Proceso físico-químico mediante el cual moléculas o iones se adhieren a la superficie de un sólido sin penetrar en su estructura interna.
Adsorbente	Material que fija contaminantes en su superficie.
Aguas residuales	Aguas cuya calidad ha sido alterada por actividades humanas y que contienen contaminantes físicos, químicos o biológicos.
Anoxia	Condición ambiental caracterizada por la ausencia casi total de oxígeno disuelto.
Autoeliminación genética	Mecanismo de bioseguridad diseñado para impedir la persistencia de organismos modificados fuera de sistemas controlados.
Bioacumulación	Proceso por el cual los organismos absorben y retienen contaminantes en sus tejidos a lo largo del tiempo.
Bioaumentación	Adición deliberada de microorganismos específicos para acelerar procesos de biorremediación.
Biocatalizador	Enzima o célula que acelera reacciones químicas.
Biochar	Material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa, utilizado como adsorbente ambiental.
Biodegradación	Transformación biológica de compuestos orgánicos en sustancias más simples mediante microorganismos.
Bioenergía	Energía obtenida a partir de procesos biológicos o biomasa.
Biofiltro	Sistema de tratamiento que emplea microorganismos adheridos a un medio sólido.

Biogás	Mezcla gaseosa rica en metano producida durante la digestión anaerobia.
Biopelícula	Comunidad microbiana adherida a superficies mediante una matriz extracelular.
Bioseguridad	Conjunto de medidas para prevenir riesgos biológicos.
Biorreactor	Equipo diseñado para llevar a cabo procesos biológicos controlados.
Biorremediación	Uso de organismos vivos para eliminar o transformar contaminantes ambientales.
Carga hidráulica	Volumen de agua aplicado por unidad de área o tiempo en un sistema de tratamiento.
Carga orgánica	Cantidad de materia orgánica presente en un efluente.
Compuestos emergentes	Sustancias no reguladas con impacto ambiental.
CRISPR-Cas9	Herramienta de edición genética de alta precisión.
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno, indicador de contaminación orgánica biodegradable.
DQO	Demanda Química de Oxígeno, indicador de materia orgánica total.
Desnitrificación	Proceso biológico que reduce nitratos a nitrógeno gaseoso.
Digestión anaerobia	Descomposición biológica de materia orgánica en ausencia de oxígeno.
Disruptores endocrinos	Sustancias que interfieren con el sistema hormonal.
Economía circular	Modelo que prioriza reutilización y valorización de residuos.
Efluente	Corriente líquida que sale de un proceso de tratamiento.
Enzimas ligninolíticas	Enzimas capaces de degradar lignina y compuestos aromáticos complejos.
Eutrofización	Enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua.

Fitorremediación	Uso de plantas para remover contaminantes.
Fitovolatilización	Transformación de contaminantes en formas volátiles por plantas.
Fotobiorreactor	Sistema cerrado para cultivo de microalgas con control ambiental.
Huella hídrica	Indicador del volumen total de agua utilizado directa e indirectamente.
Humedales artificiales	Sistemas diseñados para imitar humedales naturales en tratamiento de aguas.
Ingeniería metabólica	Modificación de rutas metabólicas para mejorar funciones biológicas.
Lombrifiltración	Tratamiento biológico de aguas mediante lombrices epigeas.
Macrófitas	Plantas acuáticas visibles empleadas en fitorremediación.
Materia orgánica	Conjunto de compuestos de origen biológico presentes en el agua.
Metales pesados	Elementos metálicos tóxicos a bajas concentraciones.
Microalgas	Organismos fotosintéticos microscópicos utilizados en tratamiento de aguas.
Microorganismos	Organismos microscópicos como bacterias y hongos.
Nanomateriales	Materiales con dimensiones nanométricas aplicados en remediación.
Nanotecnología ambiental	Uso de nanomateriales para descontaminación ambiental.
Nitrificación	Oxidación biológica del amonio a nitrato.
OMG	Organismo Modificado Genéticamente.
Oxígeno disuelto	Cantidad de oxígeno presente en el agua.
Patógenos	Microorganismos causantes de enfermedades.
pH	Medida de acidez o alcalinidad.

Pirólisis	Descomposición térmica de biomasa sin oxígeno.
Rizofiltración	Remoción de contaminantes mediante raíces.
Sedimentación	Separación de sólidos por gravedad.
Sistemas híbridos	Combinación de tecnologías de tratamiento.
Sustrato	Material que sirve de soporte microbiano.
Tratamiento primario	Etapla física inicial del tratamiento de aguas.
Tratamiento secundario	Etapla biológica del tratamiento de aguas.
Tratamiento terciario	Etapla avanzada para eliminar contaminantes residuales.
UASB	Reactor anaerobio de flujo ascendente.
Vermicompost	Producto orgánico generado por lombrices.
Zonas aeróbicas	Áreas con oxígeno disponible.
Zonas anóxicas	Áreas con bajo contenido de oxígeno.
Zonas anaerobias	Áreas sin oxígeno disuelto.
Remoción de nutrientes	Eliminación de nitrógeno y fósforo del agua.
Resiliencia del sistema	Capacidad de mantener funcionamiento ante perturbaciones.

ARCHIVO SOLO PARA VISUALIZACIÓN DIGITAL

SE TERMINÓ DE DIAGRAMAR EN
TAREA ASOCIACIÓN GRÁFICA EDUCATIVA
PASAJE MARÍA AUXILIADORA 156-164 - BREÑA
CORREO E: tareagrafica@tareagrafica.com
PÁGINA WEB: www.tareagrafica.com
TELÉFONO: (01) 244-6647
JUNIO 2026 LIMA - PERÚ



RULY TERÁN HILARES

Docente Investigador de la Universidad Católica de Santa María, nacido en Lambrama. Es Ingeniero Agroindustrial por la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con estudios de posgrado en Tecnología de Alimentos por la Universidad Nacional Agraria La Molina y Doctor en Biotecnología Industrial por la Universidade de São Paulo.

Ha realizado estancias posdoctorales e investigaciones en instituciones internacionales como Korea Advanced Institute of Science and Technology y la USP.

Sus investigaciones se enfocan en bioprocesos, valorización de residuos agroindustriales, tecnologías de membranas, tratamiento de efluentes, microalgas y bioinsumos. Cuenta con 57 artículos científicos indexados en Scopus, 11 capítulos de libro y un índice H de 27.

El agua es un recurso vital y limitado, cuya calidad y disponibilidad son determinantes para la salud de los ecosistemas, la producción agrícola, la industria y la vida humana. La biotecnología aplicada al agua surge como una herramienta estratégica para enfrentar los desafíos de la contaminación y la escasez hídrica, lo que permite la recuperación y depuración de cuerpos de agua de manera eficiente, sostenible y basada en evidencia científica.

ISBN: 978-612-99428-4-1



9 786129 942841