



Capítulo I: Guía de Biotecnología Ambiental

Guía de Biotecnología Ambiental

Environmental Biotechnology Guide

Chicaiza-Ortiz, Cristhian David ^{1,2}



Rivadeneira-Arias, Virginia del Carmen ²



Herrera-Feijoo, Robinson Jasmany³



Andrade, Jean Carlo ⁴



¹ Shanghai Jiao Tong University, ² Universidad Regional Amazónica IKIAM, ³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ⁴ Universidad Politécnica Salesiana



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.16>

Resumen: El capítulo parte de un recorrido histórico sobre los acontecimientos de la Biotecnología Ambiental y se discuten varios conceptos esenciales. Se mencionan varias aplicaciones, tales como: biomarcadores, biosensores, biocombustibles, biorremediación, biotransformación. Además, se describe las principales herramientas biotecnológicas aplicadas al monitoreo de la contaminación ambiental y a procesos de biorremediación, de las cuales se toman en cuenta las consideraciones técnicas, las estrategias de recuperación y mitigación. Se destaca una de las herramientas de biorremediación como es la fitorremediación, que abarca: fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización, rizodegradación, fitodegradación y fitovolitización. Asimismo, se proyectan las investigaciones y los proyectos más destacados en el contexto de América Latina. Además, se da a conocer algunas herramientas biotecnológicas para promover la agricultura sustentable con el uso de microorganismos como control biológico, y uso de biofertilizantes. Por último, se presentan aplicaciones para la mitigación del impacto ambiental generado por la actividad petrolera como las técnicas de inyección de CO₂ en reservorios subsuperficiales. También se mencionan las aplicaciones en la producción de nuevas fuentes de energía sustentable y tendencias biotecnológicas en el desarrollo de biomateriales alternativos al cuero y al plástico, en el que se detalla el procesamiento de micelios para la industria textil. En conclusión, esta guía sirve de apoyo para los estudiantes que estén interesados en conocer la asignatura de Biotecnología Ambiental o que estén cursando dicha asignatura.

Palabras clave: Biorremediación, fitorremediación, biofertilizantes, América Latina, energía sustentable

Abstract:

The chapter starts with a historical overview of the developments in environmental biotechnology and discusses several essential concepts. Several

applications are mentioned, such as: biomarkers, biosensors, biofuels, bioremediation, biotransformation. In addition, the main biotechnological tools applied to environmental pollution monitoring and bioremediation processes are described, of which technical considerations, remediation and mitigation strategies are taken into account. One of the bioremediation tools is highlighted as phytoremediation, which includes: phytoextraction, rhizofiltration, phytostabilization, rhizodegradation, phytodegradation and phytovolatilization. The most outstanding research and projects in the Latin American context are also presented. In addition, some biotechnological tools are presented to promote sustainable agriculture with the use of microorganisms as biological control, and the use of biofertilizers. Finally, applications for the mitigation of the environmental impact generated by oil activity are presented, such as CO₂ injection techniques in subsurface reservoirs. Also mentioned are applications in the production of new sources of sustainable energy and biotechnological trends in the development of alternative biomaterials to leather and plastic, detailing the processing of mycelia for the textile industry. In conclusion, this guide serves as a support for students who are interested in learning about Environmental Biotechnology or who are taking this subject.

Keywords: Bioremediation, phytoremediation, biofertilizers, sustainable energy, Latin America

1.1. Introducción

1.1.1. Historia

Figura 1

Breve cronología de los acontecimientos en el desarrollo de la biotecnología



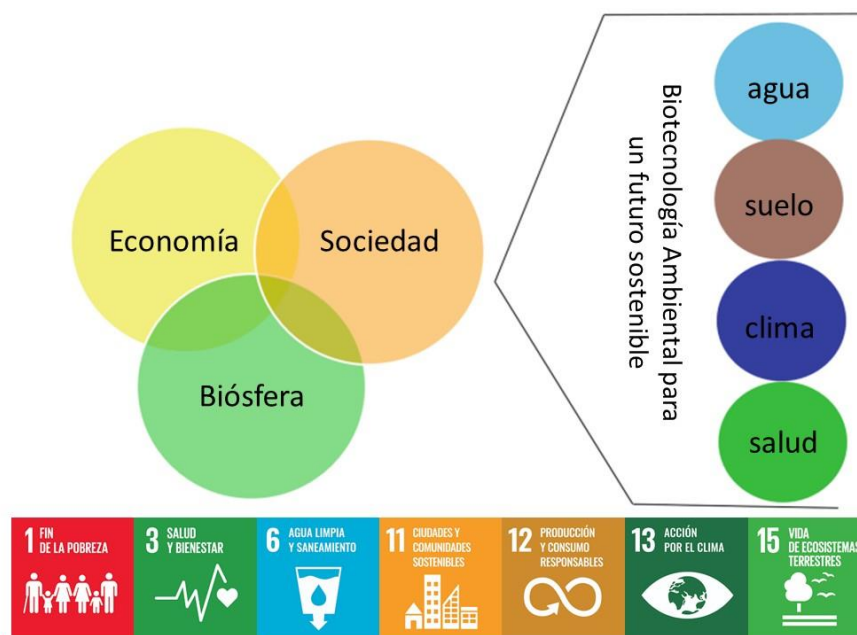
Nota: Fuente: Adaptado de Verma y Ravichandran, 2020

Las personas han definido el término biotecnología de diversas maneras. La comunidad científica está de acuerdo en que la ciencia, en su esencia, implica la aplicación de otras formas de vida para el progreso de la humanidad. Los procesos que utilizaban organismos enteros, como la levadura, eran necesarios para el procesamiento de alimentos crudos. La fermentación, por ejemplo, fue un conocimiento tradicional en varias civilizaciones utilizado para la preparación de alimentos como el pan, el queso, la masa, el vino, etc. Los agricultores de Asia Central han venido fabricando cuajada/yogur desde el 6000 a.C., el pueblo de iraquí aprendió a hacer vino con levadura y los antiguos egipcios la utilizaban para hacer pan desde el 4000 a.C. (Verma y Ravichandran, 2020).

Siglos más tarde, se produjeron numerosos descubrimientos que marcaron un hito y permitieron mejorar nuestra comprensión en varios ámbitos de la herencia, causas y curas de las enfermedades, preservación de los alimentos, mejorar las prácticas agrícolas, etc. Importantes contribuciones en el campo de la biología ampliaron el horizonte del conocimiento, lo que permitió identificar su potencial traslativo (Figura 1). Muchos de los métodos más antiguos que se practicaban se explicaron mejor posteriormente, cuando se inició la búsqueda científica para entender los procesos naturales. Por ejemplo, la fermentación fue explicada por Louis Pasteur (1879), quien en múltiples experimentos demostró que las bacterias causaban la acidificación de la leche debido a la formación de ácido láctico. Por la misma época, el descubrimiento de la vacuna contra la viruela por parte de Edward Jenner se basó en la observación de la inmunidad adquirida y anunció una nueva era de la medicina preventiva basada en la inmunización. La curación de la infección de las heridas se realizaba mediante moldes de cuajada o de queso en la prehistoria sin saber que las cataplasmas hechas con ellos contenían antibióticos. Alexander Fleming (1928) purificó el antibiótico penicilina a partir de los moldes y demostró su capacidad para curar infecciones bacterianas. Este descubrimiento se considera uno de los mayores logros científicos de la época posterior a la Segunda Guerra Mundial, ya que pudo salvar innumerables vidas (Verma y Ravichandran, 2020).

1.1.2. Conceptos

El término “biotecnología medioambiental” se creó para describir la aplicación de sistemas biológicos, desde bacterias a plantas, para la limpieza de lugares contaminados, la reducción de la polución, la detección y vigilancia de contaminantes y, más recientemente, la conversión de residuos en biopolímeros, energía y otras ventajas (Sanabria, 2014).

Figura 2*El papel de la biotecnología ambiental***Nota: Fuente:** Ghahari et al., 2021.

Esta ciencia es un conjunto de conocimientos científicos e ingeniería relacionados con el uso de organismos y sus productos para la prevención de la contaminación mediante el biotratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos (Scragg, 2005). Es decir, son métodos que usan las actividades naturales de las plantas o microorganismos como bacterias y hongos, para transformar, degradar, fijar, inmovilizar o promover la biorremediación de contaminantes y la biomonitorización del entorno y del proceso de tratamiento que consiste en evaluar la concentración de compuestos químicos o de sus metabolitos en muestras de biológicas, es decir, permite medir dosis de compuestos en el ambiente (Singh, 2017).

La vida humana depende de un delicado equilibrio entre el entorno y los organismos que lo necesitan para sobrevivir y desarrollarse en sociedades. La viabilidad a largo plazo del entorno físico indica cómo prospera una sociedad. Cada día, el tratamiento de sustancias peligrosas es un gran reto y la mejor manera de proteger el ambiente es reducir la producción de residuos y establecer esa armonía saludable entre la estética y la salud. La Biotecnología Ambiental está permitiendo avances significativos para alcanzar las metas propuestas en la agenda 2030 de la ONU (Figura 2), enmarcando siete de estos objetivos por medio de la mejora en las tecnologías de remediación en aguas superficiales y subterráneas, en suelos, en la estabilidad ecosistémica y climática y la salud de los organismos. Para satisfacer las necesidades de la generación actual sin poner en peligro las de las generaciones futuras, el desarrollo sostenible busca siempre una distribución equitativa de los recursos. La tecnología preventiva,

cuyo objetivo es fabricar productos con la menor cantidad de desechos y residuos generados para ser más eficaces y hacer realidad un marco de economía circular, es un buen ejemplo (Ghahari et al., 2021).

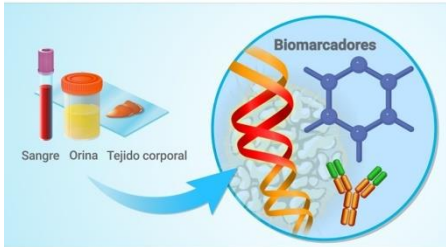
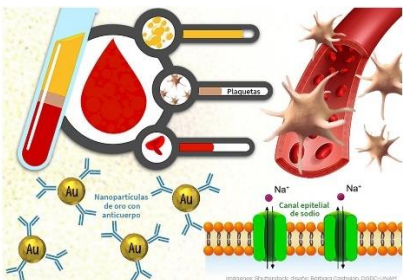
1.1.3.Aplicaciones

La Biotecnología Ambiental ha mejorado la prevención de la contaminación, el tratamiento de los residuos sólidos y las aguas residuales, una fabricación de diversos productos más eficiente en términos recursivos y la garantía de la salud ambiental a través de la biomonitorización y la ingeniería genética. Esta ciencia también puede utilizarse para reducir la toxicidad biomovilizando los residuos peligrosos, desarrollando materiales biodegradables para la sostenibilidad ambiental, produciendo combustibles a partir de biomasa y residuos orgánicos y previniendo la producción de residuos peligrosos (Singh, 2017).

A continuación, se describe en la Tabla 1 las principales aplicaciones de la Biotecnología Ambiental.

Tabla 1

Aplicaciones de la Biotecnología Ambiental y su descripción

Aplicaciones	Descripción	Referencia
<p>Biomarcadores</p> 	<p>Los biomarcadores son muchos cambios (biológicas, fisiológicas, metabólicas) que un organismo o población puede experimentar en respuesta al estrés ambiental. En consecuencia, el monitoreo biológico o biomonitoreo mediante estudios de biomarcadores se ha propuesto como un método directo para determinar las diversas respuestas biológicas de los organismos a los contaminantes ambientales.</p>	<p>Wallace, Kormos, y Pleil (2016).</p> <p>Recabarren, Ronda y Arias (2019)</p> <p>A Breath of Hope (s.f.)</p>
<p>Biosensores</p> 	<p>Un sistema analítico denominado biosensor ambiental combina un elemento biológico sensible con un transductor para detectar compuestos en el medio ambiente de forma rápida, proporcional, precisa y sensible.</p>	<p>Castro, Luna y Villalobos (2007)</p> <p>Nguyen, Kwon, y Gu (2017)</p> <p>Universidad Nacional Autónoma de México (2021)</p>

Aplicaciones	Descripción	Referencia
<p>Biocombustibles</p> 	<p>Dado que la generación de residuos agroindustriales durante la fase del proceso de producción es actualmente un problema mundial porque los subproductos no suelen procesarse adecuadamente, los biocombustibles que utilizan residuos agroindustriales tienen un impacto positivo en el medio ambiente y contribuyen significativamente al desarrollo sostenible.</p>	<p>Chia <i>et al.</i> (2018) Aguilar, Guevara, y Taboada (2021) Shutterstock (s.f.)</p>
<p>Biorremediación</p> 	<p>Dado que utiliza los mismos microorganismos que existen en el suelo y el subsuelo, la biorremediación es un método especialmente práctico para limpiar suelos contaminados. Inicialmente, se afirmó que el suelo y el subsuelo están compuestos de sustancias inorgánicas y orgánicas, así como de agua, aire y microbios.</p>	<p>Sharma, y Agrawal (2005) Cisneros, y Luis (2021) Rothschuh Osorio (2022)</p>
<p>Biotransformación</p> 	<p>Los cambios que se producen en la biología del medio ambiente que son cambios del compuesto complejo a simple no tóxico o al revés se llama proceso de biotransformación.</p>	<p>Smitha, Singh y Singh (2017) Henning, Kunkel, Wick, y (Ternes, 2018) Canal Diabetes (2017)</p>

Nota: Fuente: Autores de la tabla.

1.2. Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda de los temas más relevantes en el área de Biotecnología Ambiental, especialmente con documentos en inglés y español. Las bases de datos empleadas fueron Scopus, Web of Science y Scielo. La búsqueda se enfocó en artículos, capítulos de libros y revisiones de los últimos 10 años. Se sistematizó la información encontrada en el formato de una guía académica.

1.3. Resultados

1.3.1. Herramientas biotecnológicas aplicadas al monitoreo de la contaminación ambiental y a procesos de biorremediación

1.3.1.1. Introducción y antecedentes

El crecimiento de la población, el aumento del consumo de los recursos naturales, la expansión de las áreas urbanas, el cambio de dietas en los países en desarrollo y el aumento del consumo de energía son algunos de los principales impulsores del aumento de la demanda de tierras. Los demógrafos predicen una población mundial de 9 mil millones para 2050, con una población mundial de 9 a 12 mil millones para fines de siglo. Los ingresos personales aumentan a la par con el crecimiento de la población. Como resultado, la demanda mundial de cultivos aumentará entre un 100% y un 110% entre 2005 y 2050 que, según la ONU y la FAO, va a aumentar la producción agrícola en un 60% a nivel mundial y casi un 77% en las naciones en desarrollo. El potencial de expansión de la tierra cultivable es limitado. Alrededor de 33 M ha de suelos contaminados con elementos traza existen en todo el mundo. Esta estimación es conservadora debido a la falta de datos publicados sobre tierras contaminadas en países en desarrollo. Además, la mayoría de los países carecen de recursos para reparar o asegurar las tierras contaminadas (Evangelou et al., 2012).

El suelo es un recurso que posee un ecosistema frágil que se ha visto afectado por las actividades antropogénicas (Ferreira et al., 2018). La degradación del suelo afecta a más de 1.500 millones de personas en varios países (Kumar et al., 2016). La Comisión Europea menciona entre las más destacadas amenazas al suelo, las siguientes: 1) erosión; 2) disminución de la materia orgánica (MO); 3) contaminación del suelo; 4) sellado del suelo; 5) compactación del suelo; 6) disminución de la biodiversidad del suelo; 7) salinización; 8) inundaciones y 9) deslizamientos de tierra (Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. In: Thematic Strategy for Soil Protection [COM 2006.231], 2006). Estas amenazas son consecuencia de actividades humanas como la urbanización, la agricultura intensiva y las alteraciones en los entornos forestales. El uso de la tierra en un suelo determinado va a depender de sus características físicas, químicas y biológicas (García et al., 2012). Cada año se pierden entre 5 y 6 millones de hectáreas (Kumar et al., 2016). Por otro lado, la calidad del suelo permite la regulación de sus funciones necesarias para mantener la productividad animal y vegetal del suelo (Maurya et al., 2020).

1.3.1.2. Consideraciones técnicas

Cualquier alteración del suelo provoca cambios en sus características físicas (textura, densidad aparente, etc.), químicas (pH, salinidad, carbono orgánico, etc.) y biológicas (microbios y enzimas). Estas características sirven como indicadores de calidad para el suelo (Maurya et al., 2020), ya que la fuga de nutrientes del suelo lo vuelve incapaz de sustentar cultivos o plantas que previenen la desertificación (Aelion, 2017). Las cualidades intrínsecas del suelo no varían significativamente con el manejo; están determinadas por el clima, la topografía, el material parental, la biota y el tiempo; y los atributos dinámicos están influenciados por la gestión humana y las perturbaciones naturales a lo largo del tiempo (Soil Quality Indicators-Physical, Chemical, and Biological Indicators for Soil Quality Assessment and Management, 2015).

Hay que considerar que la vegetación tropical tiende a recuperarse, y los hábitats andinos presentan una dificultad particular. El ecosistema páramo no se recupera del daño a nivel del suelo porque tiene una capa muy delgada de materia orgánica y se descompone al introducir herramientas mecánicas, perdiendo su capacidad de renovación (Suquilanda, 2008).

La pérdida de la base nutricional del suelo, la acidificación, salinización, dosificación, el aumento de la toxicidad por liberación o concentración de elementos químicos, afecta la actividad de los microorganismos, contribuyen a la degradación del suelo. A esto se suma la contaminación del suelo provocada por las actividades petroleras y mineras, que ha perjudicado no solo a los ecosistemas sino también a la biodiversidad (Espinosa et al., 2018).

1.3.1.3. Estrategias de recuperación y mitigación

Si bien la explotación petrolera genera la mayor parte de los ingresos económicos de varios países, tiene una serie de consecuencias negativas para los suelos, incluida la alteración y fragmentación de ecosistemas y hábitats, la sobreexplotación de la flora silvestre y la introducción de especies, la contaminación ambiental, la falta de atención a los problemas de deforestación. La deforestación es necesaria para facilitar la producción de crudo en muchos aspectos. Adicionalmente, los residuos peligrosos generados por esta operación, que ocurre a mayor profundidad de extracción de crudo, contienen niveles más altos de toxicidad, incluyendo metales pesados, compuestos radioactivos y otros contaminantes (INIAP, 2018). Varios tipos de suelos son aptos para sistemas agroforestales porque consisten en cultivos permanentes, pastos y cobertura forestal (MAE, 2015). La agrosilvicultura y la fitorremediación son opciones viables para asegurar un manejo sostenible y prevenir la degradación de los suelos amazónicos por su fragilidad.

Existen estrategias de remediación que pueden resultar interesantes, como el Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS), que pueden ser

replicables. El PRAS brindó asistencia técnica a las operaciones de PETROAMAZONAS en la microcuenca Pacayacu que ha sido impactada por actividades hidrocarburíferas. La propuesta consistió en la erradicación de fuentes de contaminación en las fincas y aplicar sistemas agroforestales para proteger especies permanentes y semipermanentes. Además, esta técnica protege también los suelos no afectados. Posteriormente se contempló la mejora de los sistemas de producción de café, cacao y pastos para satisfacer las necesidades de los agricultores, compensaciones de carbono mediante el secuestro por la vegetación y la recuperación de la cubierta forestal, la restauración de cercas vivas, y el reemplazo del suelo con gramíneas y leguminosas que alimentan a los animales (MAE, 2015).

1.3.1.4. Investigaciones y proyectos en América Latina

Como la mayoría de los países de América Latina, Ecuador es un país megadiverso con una gran riqueza natural, pero tiene un gran desafío respecto a la erosión del suelo. Los cambios ecológicos, los cambios en el uso de la tierra y la extensión de las fronteras agrícolas y ganaderas están afectando la productividad de los recursos naturales de Ecuador (Suquilanda, 2008). Algunas regiones de la cuenca del río Jubones están siendo desertificadas, lo que la convierte en uno de los principales problemas ambientales del país; algo similar ocurre en ciertas zonas de las provincias de Manabí, Tungurahua y Cotopaxi (Bravo et al., 2021). Los frágiles ecosistemas y las características geológicas únicas de la región amazónica de Ecuador la hacen particularmente vulnerable a la degradación severa del suelo, debido a una topografía irregular y pendientes pronunciadas, el ambiente es muy vulnerable a la erosión (Espinosa et al., 2018). Además, los suelos de esta zona tienen una composición química caracterizada por una alta acidez, la presencia de aluminio, alto contenido de materia orgánica y una baja disponibilidad de fósforo y bases intercambiables, como potasio, calcio y magnesio, que definen sus cualidades físicas, químicas y biológicas (Bravo et al., 2021).

Figura 3

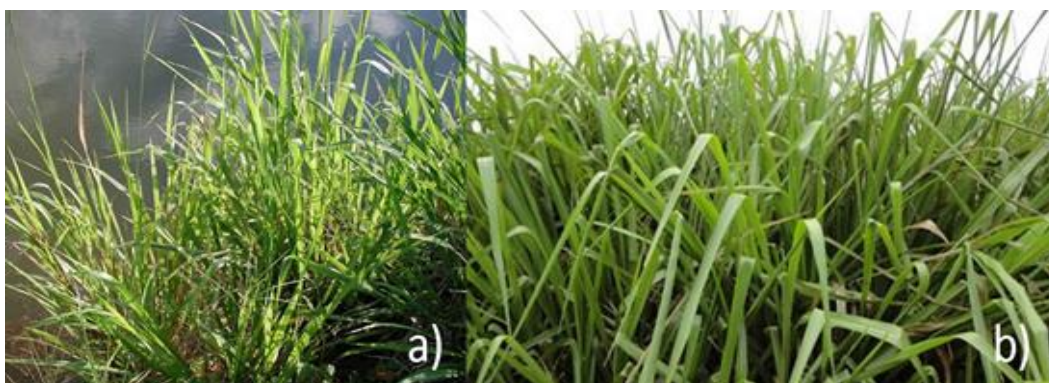
Especie vegetal (a) *Leersia hexandra* (b) con la capacidad de fitorremediar gleysoles



Nota: Fuente: Arias et al., 2017.

Figura 4

Especies utilizadas para fitorremediación: (a) *Panicum máximo*, (b) *Brachiaria brizantha*



Nota: Fuente: Hernández y Mager., 2003.

Un suelo contaminado con un hidrocarburo de petróleo a una concentración del 3% fue fitorremediado por Hernández-Valencia y Mager (2003), utilizando dos especies de gramíneas (Figura 3), *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha*. Aunque la biomasa extrema y foliar de las dos plántulas se vio muy afectada, a los 240 días estos pastos tenían menos contaminación que los suelos control sin vegetación. Por lo tanto, Hernández-Valencia y Mager (2003), clasificaron a estas especies como de potencial para la recuperación de bandadas pasivas, beneficiosas y estéticamente atractivas. Por otra parte, Arias et al. (2017), encontraron que *Leersia hexandra* puede fitorremediar Gleysoles (Figura 4) que contienen aceite tanto en entornos tropicales inundados, con tasas de descontaminación que van del 66% al 87% tanto para el aceite fresco como para el degradado, respectivamente.

Castaño (2018) investigó la capacidad de fitorremediación de *Brachiaria brizantha*, usándola para remediar crudos con diferentes densidades API y consiguió una disminución del 80% de los hidrocarburos en los suelos investigados. Sin embargo, se recomienda un mínimo de 4 meses para obtener resultados rentables, junto con un aumento de fertilizante y el considerar la edad de la planta al momento de la siembra. Zúñiga (2020) utilizó a *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms a menudo conocida como flor de agua, para eliminar cadmio (Cd) del suelo. El metal pesado se acumuló en sus componentes radicales y aéreos con una concentración inferior a 100 mg/kg, por lo que no es una especie hiperacumulativa. Además, el uso de bioestimulación y fitorremediación puede remediar positivamente suelos contaminados con hidrocarburos, por ejemplo, se puede alcanzar una reducción del 75.7 % para hidrocarburos totales de petróleo (abreviados TPH en inglés) y una reducción del 65.95 %, y 70.27 % para Cd, y Pb, respectivamente (Veloz et al., 2015).

En cuanto a los casos en América Latina, son varios los estudios conducidos en diversos países como Brasil, Chile, Argentina, México o Colombia. el destacar el

hecho de la existencia de un factor común que muestra sin duda, una tendencia hacia la biorremediación; como una herramienta básica del tratamiento de problemas de contaminación ambiental en esta región.

Sin duda alguna la ubiquidad de los microorganismos es una cualidad única que les confiere habilidades potenciales para ser aprovechadas por la biotecnología. En Chile se llevan a cabo estudios progresivos sobre microorganismos extremófilos, los cuales son capaces de adaptarse, sobrevivir o desarrollarse en ambientes muy hostiles, que pueden resultar letales. Chile posee una amplia gama de este tipo de ambientes tales como: salares, manantiales geotérmicos, géiseres, montañas y campos de hielo, lagos, etc., de donde se han aislado extremófilos en diversas zonas con posibles aplicaciones biotecnológicas (p. ej., *Methanofollis tationis* de Tatio Geyser), acidófilos (p. ej., *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferriphilum* del desierto de Atacama y minerales de cobre de Chile Central), halófilos (p. ej., *Shewanella* sp. Asc-3 de Altiplano, *Streptomyces* sp. HKF-8 de la Patagonia), alcalófilos (*Exiguobacterium* sp. SH31 del Altiplano), bacterias xerotolerantes (*S. atacamensis* del Desierto de Atacama), bacterias resistentes a UV y Gamma (*Deinococcus peraridilitoris* del Desierto de Atacama) y psicrofilos (ej., *Pseudomonas putida* ATH-43 de la Antártida) (Orellana, et al., 2018). Los avances técnicos han convertido la biorremediación en un servicio ecosistémico a gran escala adecuado para el tratamiento de suelos contaminados en todo el mundo; sin embargo, su aplicación en Chile es escasa. El costo de la biorremediación en un estudio estimó cantidades entre USD 50.7 y USD 310.4 por m³ de suelo contaminado. Además, se identificaron actividades que tuvieron los impactos más significativos en el costo final, como compost para bioestimulación y medios de crecimiento bacteriano para enfoques basados en bioaumentación. Los costos proyectados se compararon con una base de datos de 130 proyectos de biorremediación de suelos, concluyendo que los costos del se ubicaron dentro del 60% superior de los proyectos más costosos, lo que destaca el gran esfuerzo involucrado en la biorremediación de suelos crónicamente contaminados. Esto resulta en una gran ventaja para los tomadores de decisiones, consultores, investigadores y autoridades gubernamentales al momento de lanzar iniciativas para desarrollar la biorremediación por medio de la industria local y con capacidad para limpiar un alto número de sitios contaminados en Chile.

La importancia de este trabajo radica también en hacer notar que, hasta la fecha, no son vastas las investigaciones aplicadas que han utilizado técnicas de biorremediación para limpiar los ecosistemas. Por ejemplo, en Brasil, se han llevado a cabo algunos estudios sobre derramamiento de petróleo y las consecuencias sobre las costas del país. Por ejemplo, en la investigación de Rosa y Triguís (2007,) los resultados de una simulación encontraron una dosis correcta de NPK para estimular el proceso de biodegradación que no mostraba efectos tóxicos para la biota local y, por lo tanto, no comprometía la aplicabilidad

de la técnica. La metodología estuvo basada en el cultivo de bacterias responsables de reducir el impacto ambiental costero contaminado con derrames de petróleo. Demostraron que hubo una reducción en fracción saturada con un enriquecimiento relativo en compuestos polares (NSO, por sus siglas en inglés), una fracción aromática constante restante del petróleo. También se concluyó que aquellas muestras tomadas a 5 cm de profundidad se biodegradan más que en las superficies de las muestras, principalmente por la cantidad de humedad del suelo. En la fracción saturada, la reducción fue más expresiva en alcanos lineales que en isoprenoides, confirmando de esa manera un orden de susceptibilidad de biodegradación. Finalmente, las simulaciones de biorremediación fueron clasificada como moderada, alcanzando el nivel 5 en la escala de clasificación de Peters y Moldowan (1993).

En Argentina, por ejemplo, hay pocos estudios dedicados a técnicas de biorremediación como la bioestimulación, la cual es una metodología ampliamente utilizada para la biorremediación de hidrocarburos en un suelo. Un estudio estuvo enfocado en determinar las relaciones C:N:P, humedad y concentración y tipo de hidrocarburos para estudiar la viabilidad de un proceso de biodegradación de hidrocarburos en un suelo de la ciudad de Río Gallegos, Argentina. Para este propósito, se realizaron cuatro bioensayos utilizando microcosmos para determinar las condiciones de C:N:P (100:7.5:0.75, 100:5:0.5, 100:2.5:0.25 and 100:1:0.1), humedad (0% - 15 %), así también una concentración de hidrocarburos (0% - 5 %). La evaluación de los experimentos tomó en cuenta procesos como la mineralización y la cuantificación de hidrocarburos y de bacterias heterótrofas y degradadoras de hidrocarburos. Al final se concluyó que la relación C:N:P óptima fue de 100:2.5:0.25, con un rango de incorporación de humedad de entre 10-15% para un suelo con 3% de hidrocarburos. Los resultados mostraron que cuando los hidrocarburos de la nafta son eliminados del suelo en un 100%, la actividad bacteriana puede recuperarse y desarrollar la biodegradación del gasoil, y en menor medida los del aceite. Esto se resume en la gran aplicabilidad, escalabilidad y potencialidad de estas técnicas en la región (Cambarieri, Pucci, y Acuña, 2021).

En la región latinoamericana, varios países generan continuamente diversas propuestas de aplicabilidad de la biotecnología ambiental. Tal es el caso de México, uno de los países más biodiversos del mundo donde encontramos ecosistemas destacables como los arrecifes de coral, que proporcionan varios servicios a las comunidades costeras, como la recreación y la pesca comercial. Las fuentes de contaminación por hidrocarburos en Veracruz, México incluyen la industria petrolera, así como el turismo y las actividades marítimas. Una investigación evaluó la contaminación por hidrocarburos en arrecifes en el Golfo de México a lo largo de la costa de Veracruz contaminada con octano, nonano, hidrocarburos aromáticos incluyendo fenantreno, dotriacontano, tetratriacontano, hexatriacontano, octatriacontano, tetracontano y

tetratriacontano. Los análisis mostraron que la concentración de hidrocarburos en cuerpos de agua superaba el límite de descarga de aguas producidas de la industria petrolera de 15 ppm en agua dulce y 40 ppm en agua de mar. Para tal efecto se cultivó un consorcio microbiano compuesto por *Acinetobacter bouveti*, *Defluviobacter lusatiensis*, *Xanthomonas* y *Shewanella* en un biorreactor con 20 g.L⁻¹ de diésel y gasolina como única fuente de carbono. Los resultados mostraron que aproximadamente el 91.39 % del diésel se degradó en medio de agua de mar y el 97.55 % en medio mineral después de 14 días. Además, el 95.05 % de la gasolina se degradó en un medio de agua de mar y el 98.79 % en un medio mineral durante el mismo período de tiempo. En todos los experimentos, el consorcio mostró que la actividad del emulsionante aumentó y el diámetro de las gotas de hidrocarburo disminuyó con el tiempo (Narciso-Ortiz, et al., 2020).

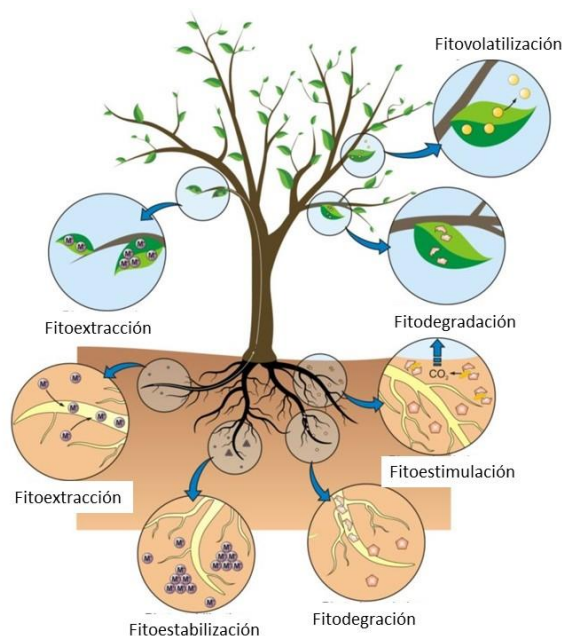
En Colombia se han reportado varios derrames de petróleo en antiguas áreas de extracción de petróleo y en infraestructura petrolera que causaron grandes daños en los ecosistemas. Mediante pruebas piloto de laboratorio de biorremediación de suelos contaminados con petróleo en Sylvania, Colombia, se investigaron tres tratamientos de Bioestimulación: Bioaumentación (B), Bioaumentación con Surfactante (SB), Bioestimulación (Bs), Bioestimulación con Surfactante (SBs) y Bioestimulación con Surfactante con D-Limonene (SBsDL). Además, se consideró el efecto del surfactante Tween 80 en la degradación de TPH en los tratamientos de biorremediación (Bioestimulación y Bioaumentación) en condiciones anaeróbicas. Para los tratamientos de Bioaumentación se incrementó la densidad bacteriana mediante compostaje y en los tratamientos de Bioestimulación se aplicaron nutrientes y enmiendas. Adicionalmente, se realizó el tratamiento de Atenuación Natural (NA) y el tratamiento de Control (C). Tras 90 días de evaluación, la degradación de TPHs en los resultados para cada tratamiento fueron: Control (53.8%), NA (57.7%) B (65.4%), SB (69.2%), Bs (75.0%), SBs (76.9%) y SBsDL (76.9%). Los resultados obtenidos mostraron que los tratamientos de biorremediación con surfactante tienen mayores porcentajes de biodegradación de TPHs, además de que el aumento de la población microbiana y la estimulación con nutrientes en los tratamientos de biorremediación en condiciones anaerobias tuvo un efecto positivo en los experimentos. Las pruebas de laboratorio finalmente ayudaron a concluir que hasta el 76.9 % de los contaminantes del petróleo se degradaron en 90 días, lo que indica la viabilidad de desarrollar un protocolo de biorremediación a gran escala (Delgado, Pérez, Cardona y Loaiza-Usuga, 2019).

Si bien es cierto en la región de América Latina se desarrollan varias propuestas, no se debe dejar de lado el hecho de ser prioritariamente consideradas opciones viables para la conservación de los ecosistemas; bajo costo y amigables con el ambiente y tienen la potencialidad de servir como herramientas eficientes para la gestión ambiental y restauración de ecosistemas.

1.3.1.5. Evaluación de tecnologías de fitorremediación

A continuación, se describe por medio de representaciones gráficas, los diferentes métodos de fitorremediación más exitosos a la fecha. En la figura 5, un esquema generalizado de las técnicas.

Figura 5
Esquema generalizado

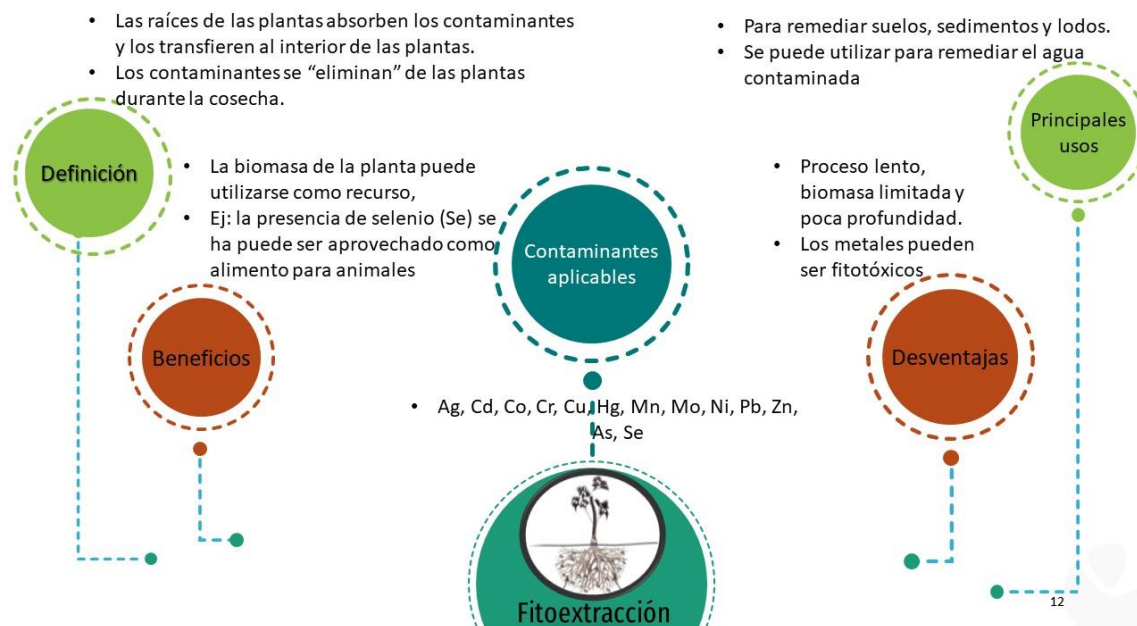


Nota: Esquema de resumen de las diferentes tecnologías de fitorremediación según la zona de interacción de la planta. **Fuente:** Bhat et al., 2021; Rigoletto., 2020; Chrobok, 2022

1.3.1.5.1. Fitoextracción

En la figura 6 se observan conceptos relacionados a la fitoextracción, ventajas y desventajas, así como también un rango determinado de aplicabilidad a contaminantes. La plantación de un cultivo de una especie que se sabe que recoge los contaminantes en los brotes y hojas de la planta, la cosecha del cultivo y la posterior eliminación de la contaminación del lugar se conoce como fitoextracción. Este método crea un gran número de plantas y contaminantes (normalmente metales) que deben transportarse para su eliminación o reciclaje, a diferencia de los métodos de degradación destructiva. En comparación con la excavación y el vertido, este método de Biotecnología Medioambiental deja una cantidad significativamente menor por retirar (EPA, 2000).

Figura 6
Fitoextracción



Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.5.2. Rizofiltración

En el sentido de que es una técnica de concentración que puede utilizarse en la rama de la biotecnología medioambiental, la rizofiltración es comparable a la fitoextracción. El método se basa en la acumulación de contaminantes en las raíces y su posterior recolección mediante técnicas de cultivo hidropónico (sin suelo), lo que lo diferencia de la fitoextracción. Es útil para eliminar los contaminantes metálicos del agua. La rizofiltración ha demostrado ser eficiente también para la remoción de radionúclidos (EPA, 2000). En la figura 7 se pueden observar algunos conceptos interesantes acerca de los beneficios, desventajas y el medio en el cual la técnica se puede desarrollar.

Figura 7
Rizofiltración



Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000

1.3.1.5.3. Fitoestabilización

Un contaminante puede inmovilizarse en el suelo mediante la absorción y acumulación radicular, la adsorción radicular o la precipitación dentro de la zona radicular de las plantas. Este proceso se conoce como fitoestabilización. Para detener el movimiento de contaminantes a través de la dispersión del suelo, la lixiviación y la erosión eólica e hídrica, también es necesario utilizar las plantas y sus raíces. Esta técnica se produce a través del microbiota del suelo, la química de la zona de raíces y/o la alteración del entorno del suelo o la química de los contaminantes (EPA, 2000). En la figura 8 se observan varias consideraciones generales de la técnica, así como también sus ventajas y desventajas más relevantes.

Figura 8
Fitoestabilización



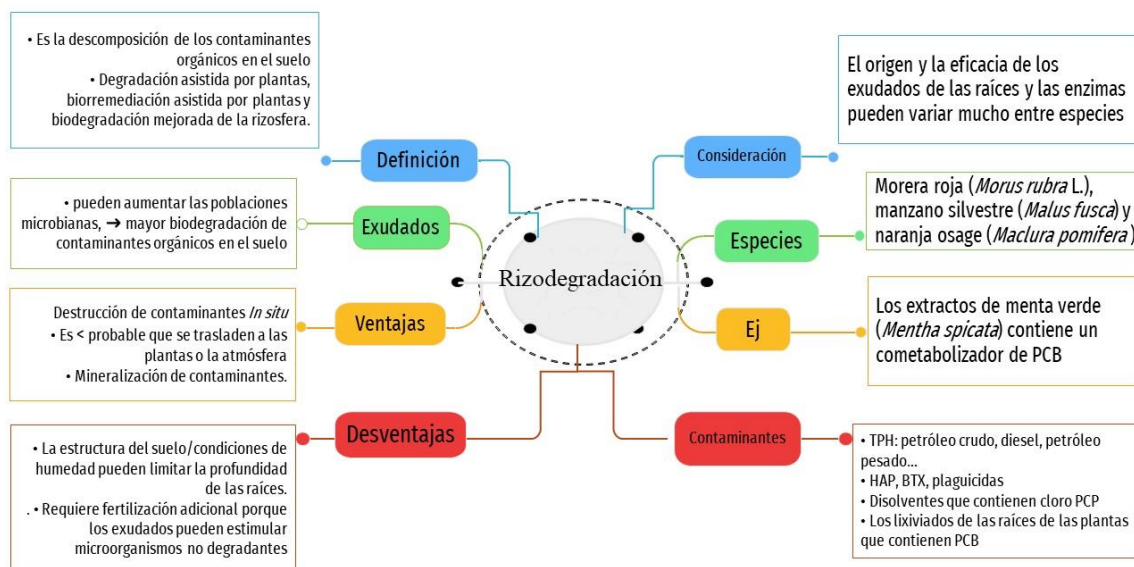
Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.5.4. Rizodegradación

La rizodegradación, acelerada por la presencia de la zona radicular, es la actividad microbiana que descompone los contaminantes orgánicos del suelo. Este método es compatible con la biorremediación in situ asistida por plantas que se ayuda de la rizosfera y es un subconjunto de la biotecnología medioambiental. Así pues, el mecanismo para aplicar la rizodegradación es esta biodegradación de la zona radicular (EPA, 2000).

Los compuestos elaborados por las plantas y vertidos por las raíces de las plantas se conocen como exudados radiculares. Entre ellos se encuentran azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroides, factores de crecimiento, nucleótidos, flavanonas, enzimas y otras sustancias. Los exudados pueden estimular las poblaciones microbianas y la actividad en la rizosfera, lo que puede conducir a un aumento de la biodegradación de contaminantes orgánicos en el suelo. La rizosfera también aumenta significativamente la superficie en la que puede fomentarse la descomposición microbiana activa, o la biodisponibilidad del contaminante. Es importante destacar que el co-metabolismo de los contaminantes en la rizosfera podría ser el resultado de la descomposición de los exudados (EPA, 2000). En la figura 9 se puede observar de manera más práctica, lo mencionado en este apartado.

Figura 9
Rizodegradación

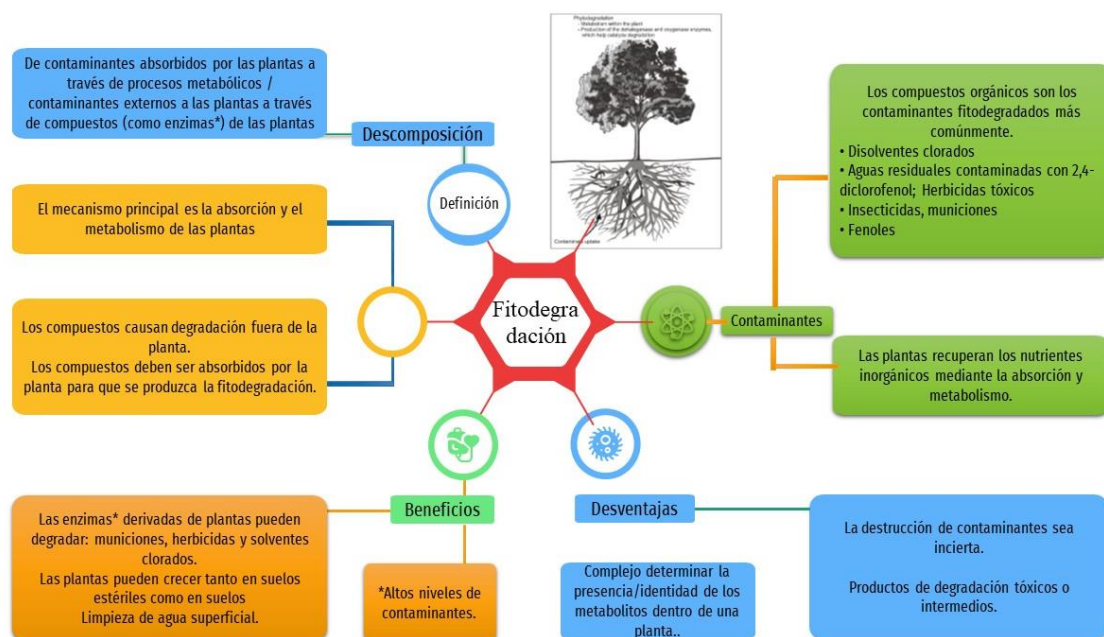


Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.5.5. Fitodegradación

La descomposición de los contaminantes ingeridos por las plantas mediante mecanismos metabólicos internos se conoce como fitodegradación o fitotransformación. Además, es la descomposición de contaminantes externos a la planta debido a la acción de sustancias químicas y exudados (como enzimas) fabricados por las plantas. En conclusión, el proceso primario es la absorción y transformación del contaminante, que están mediadas por el metabolismo de la planta. Además, como se liberan las sustancias químicas que catalizan la transformación, el deterioro puede tener lugar fuera de la planta. En resumen, podemos decir que cualquier deterioro provocado por microorganismos conectados a las raíces de las plantas o que las afectan se denomina rizodegradación (EPA, 2000). En la figura 10 se puede observar un breve resumen sobre los principales beneficios, desventajas y mecanismos de funcionamiento de la fitodegradación.

Figura 10
Fitodegradación

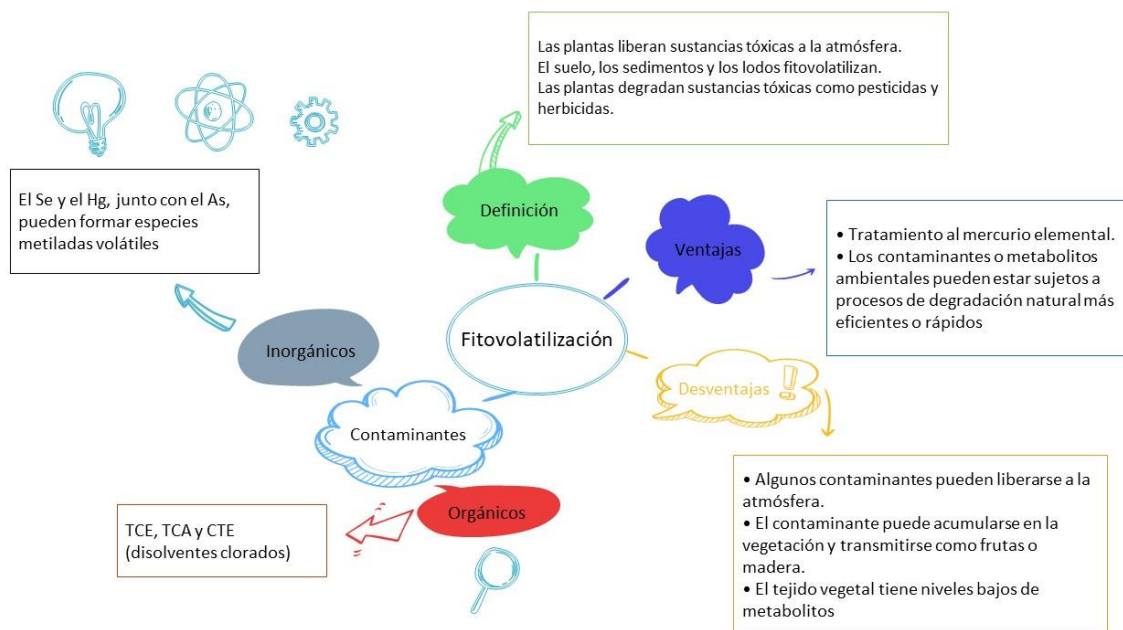


Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.5.6. Fitovolatilización

La fitovolatilización de un contaminante del suelo o el agua de un sitio promedio de las plantas hacia la atmósfera es otro mecanismo aplicable de la Biotecnología Ambiental. A menudo se plantea como una preocupación en respuesta a un proyecto de fitorremediación propuesto, pero no se ha demostrado que sea una vía real para un rango variado de contaminantes. Por otra parte, si se ha demostrado que el mercurio (Hg) se puede movilizar a través de una planta y luego hacia el aire, gracias a ensayos realizados en una planta que fue alterada genéticamente. La idea detrás de este cambio de medios es que el Hg elemental en el aire presenta menos riesgo que otras formas de Hg en el suelo (EPA, 2000). Tal como se aprecia en la figura 11, existen varias ventajas y desventajas derivadas de esta técnica, sin embargo, promete ser un área de la Biotecnología Ambiental prometedora y que necesita estudios a posterioridad.

Figura 11
Fitovolatilización



Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.6. Selección del sistema de fitorremediación y consideraciones de diseño

1.3.1.6.1. Consideraciones sobre contaminantes

Los elementos metálicos, metaloides, no metales, radionúclidos, hidrocarburos de petróleo, solventes clorados, pesticidas, conservantes, surfactantes y otros tipos de contaminantes son susceptibles de tratar por fitorremediación. Sin embargo, las altas concentraciones de contaminantes pueden limitar la fitorremediación porque producen toxicidad o reducen el crecimiento de las plantas. Los compuestos del suelo envejecidos pueden ser menos biodisponibles, esto reduce la fitotoxicidad, pero también reduce la eficacia de la fitorremediación. Las concentraciones fitotóxicas deben determinarse para un lugar específico, aunque los valores de la literatura pueden ayudar a tener un marco de referencia más amplio. Por ello es importante considerar que los datos de concentración de un sitio muestreado o del laboratorio, pueden no ser aplicables a otro sitio con diferentes condiciones de suelo y geoquímicas. El pH de un medio contaminado puede afectar el crecimiento de las plantas al alterar la biodisponibilidad de nutrientes o toxinas. También es posible que una sola planta o un método de fitorremediación no traten eficazmente diversos contaminantes, por ello pueden ser necesarias varias plantas o un tren de tratamiento con otras tecnologías. Finalmente, al aplicar los resultados de estudios de laboratorio individuales a mezclas de desechos, se deben considerar los efectos sinérgicos o antagónicos. Por ejemplo, el comportamiento de

fitorremediación de una planta (absorción de metales) puede ser diferente para las mezclas de metales que para un solo metal (Pivetz, 2015).

1.3.1.6.2. Consideraciones de las plantas

La introducción de nuevas especies de plantas debe estudiarse y supervisarse cuidadosamente. Deshacerse de las plantas cosechadas puede resultar difícil si contienen metales pesados (Ram et al., 2018).

La morfología y la profundidad de las raíces son cruciales para la fitorremediación. Un sistema de raíces principales (como la alfalfa) tiene una raíz central grande. Muchos hiperacumuladores, como *Thlaspi caerulescens*, tienen raíces principales, lo que limita el contacto con el suelo. Debido a que se requiere un contacto cercano entre la raíz y el contaminante o el agua, la profundidad de la raíz impacta directamente en la profundidad del suelo que puede remediarse usando pozos de extracción, donde el agua subterránea se puede bombear a la superficie y aplicarse a un sistema de fitorremediación. Al plantar, se pueden usar tubos de plantación para restringir la infiltración de agua, lo que obliga a las raíces a extenderse más profundamente para obtener agua. La fertilidad del suelo, la presión del cultivo, la concentración de contaminantes y otros factores afectan la profundidad de las raíces. Las profundidades menores tienen más masa de raíces que las profundidades más profundas. Una gran masa de raíces y biomasa pueden ser beneficiosas para la fitorremediación, ya que permiten una mayor acumulación de metales, transpiración de agua, asimilación y metabolismo de contaminantes y producción de exudados y enzimas. Sin embargo, algunas características de las plantas, como los exudados de las raíces, pueden ser más importantes para la eficacia de la fitorremediación que la biomasa. Debido a sus sistemas de raíces más grandes, las plantas terrestres son fitorremediadores más efectivos que las plantas acuáticas. La planta y la variedad vegetal elegida deben ser adecuadas para las condiciones climáticas y del suelo del lugar, así como para la eficacia de la fitorremediación. Las plantas que puedan competir y adaptarse a las condiciones cambiantes tendrán una ventaja. Dependiendo del clima y las condiciones del suelo, la planta puede requerir resistencia o tolerancia a enfermedades. En suelos salinos o aguas subterráneas, se pueden requerir plantas resistentes a la sal (halófitas) como el cedro salado. El uso de freatófitos puede mejorar el control hidráulico de las aguas subterráneas. Otras consideraciones de selección de plantas incluyen plantas anuales o perennes, monocultivos o especies de plantas mixtas y árboles de hoja caduca. Las semillas o plantas (o variedad de plantas) deben ser nativas o adaptadas al sitio de fitorremediación. El establecimiento de vegetación requiere semillas viables y plantas libres de enfermedades (Ram et al., 2018).

Figura 12
Sorghum vulgare



Nota: Fuente: Balderas-León & Sánchez-Yáñez., 2015.

La gramínea *Sorghum vulgare* es extensamente usada en procesos de fitorremediación (Balderas-León y Sánchez-Yáñez, 2015), se presenta un ejemplo de cultivo en la Figura 12; que se complementó con una bioestimulación con cepas bacterianas que promueven el crecimiento vegetal *Bacillus cereus* y *Burkholderia cepacia*. Ambos fueron usados en la degradación de aceite residual automotriz, detectado en un suelo contaminado con una concentración de 75 000 ppm del contaminante. Al finalizar, se redujo a 32 500 ppm durante todo el proceso de biorremediación, 10 100 ppm después de 90 días y 800 ppm durante la fase de floración. Si bien se logró la descomposición hasta una concentración de 210 ppm durante la etapa de bioestimulación con vermicompost y fitorremediación con *Sorghum vulgare*, después de agregar *B. cereus* y *R. etli*, la concentración del aceite residual se redujo a 260 ppm (Juarez-Cisneros y Sanchez-Yanez, 2014).

1.3.1.6.3. Consideraciones del sitio

El éxito de la fitorremediación varía según la ubicación. Las condiciones climáticas también afectarán su eficacia. También depende del establecimiento de una comunidad vegetal y solo funciona en suelos superficiales. Además, es posible que se requiera riego durante varias temporadas para establecer las plantas. Durante este período inicial, se debe considerar la contaminación adicional del suelo y las aguas subterráneas. Las altas concentraciones de contaminantes pueden matar las plantas. La fitorremediación se usa típicamente en sitios poco contaminantes con suelos poco profundos, arroyos y contaminación de aguas subterráneas (Ram et al., 2018).

Debido a que las concentraciones de metales potencialmente tóxicos pueden acumularse en la parte aérea de la planta, el acceso a las plantas y los desechos de las plantas debe ser monitoreado constantemente y tomar precauciones

como restringir el acceso de los animales y desechar adecuadamente el material vegetal. Además, las condiciones del suelo deben ser adecuadas para el crecimiento de las plantas y la migración de contaminantes a la planta y al mismo tiempo, evitar la lixiviación de metales. Para aumentar la biodisponibilidad y la absorción de metales por las plantas, es posible que sea necesario ajustar el pH del suelo y/o agregar agentes quelantes. Se debe considerar que cuando se trata de la fitorremediación en aguas subterráneas, las consideraciones principales son la profundidad del agua subterránea y la profundidad de la zona de contaminación. La fitorremediación de las aguas subterráneas se limita en gran medida a los acuíferos no confinados con una capa freática al alcance de las raíces de las plantas. Los hiperacumuladores se encuentran con frecuencia en áreas geográficas limitadas y es posible que no puedan crecer en otras condiciones climáticas (EPA, 2000).

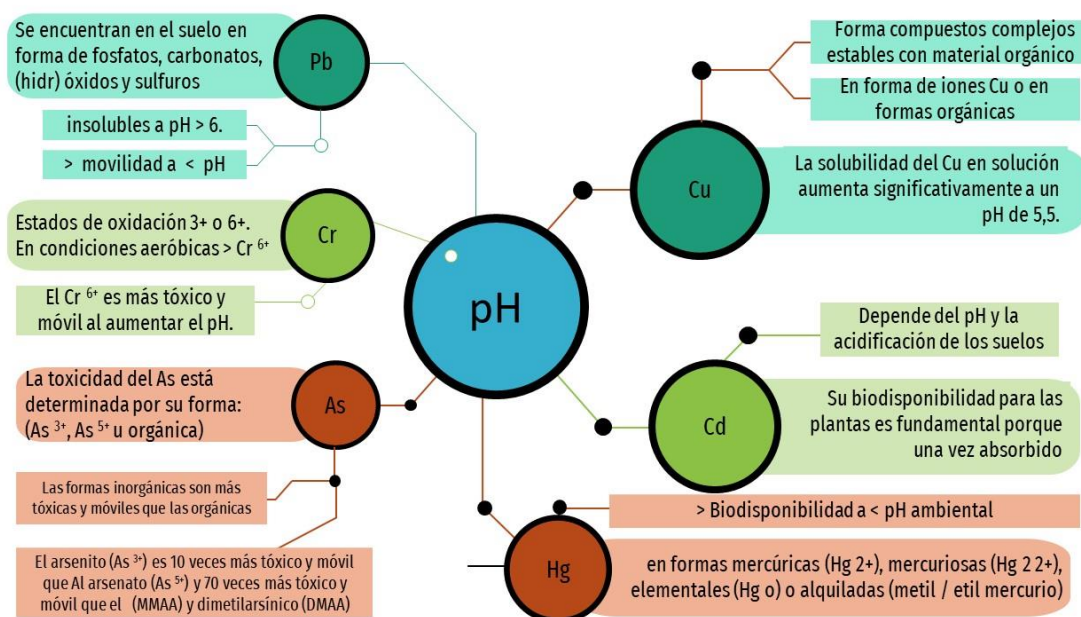
Los factores ambientales generalmente se dividen en dos categorías: bióticos (vivos) y abióticos (no vivos). Incluye todos los seres vivos y todos los factores abióticos como el clima (lluvia, insolación, temperatura, nubosidad, nieve), rocas, océanos y ríos, así como factores antropogénicos (todos los factores producidos por la actividad humana como contaminantes orgánicos y / o inorgánicos). Debido a que todos los factores están interrelacionados, cambiar uno puede afectar a todo el sistema. La evitación del estrés y la tolerancia son dos estrategias principales que utilizan las plantas para adaptarse a condiciones ambientales adversas (crecimiento en áreas muy contaminadas, sequía, salinidad). La selección de plantas es fundamental, pero las influencias externas (interacciones de elementos en suelos contaminados) son permanentes (factores abióticos). El rango de tolerancia, junto con los valores máximo, óptimo y mínimo de factores particulares, determina la tolerancia y adaptabilidad de la planta. Para las plantas con un pequeño aumento de crecimiento anual en áreas propensas a inundaciones (incluso más de la mitad de la altura de las plantas), un aumento prolongado en el nivel del agua da como resultado el marchitamiento de la mayoría de ellas. Zn, Ni y Cd están menos disponibles en suelos anegados debido a la disminución. Sin embargo, la eficacia de la fitorremediación depende en gran medida de la biodisponibilidad de los oligoelementos en el suelo, que depende por completo de las propiedades de la solución del suelo. Las propiedades químicas del suelo, como el pH, Eh y el contenido de nutrientes, tienen un efecto sobre las formas metálicas que existen en él y su acumulación. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que la mayoría de los metales en el suelo están inmovilizados debido a su asociación con componentes específicos de la matriz, y solo una pequeña proporción de metal del suelo está biodisponible para la absorción de las plantas. Los metales deben estar biodisponibles para las plantas (Magdziak et al., 2015).

El transporte de metales pesados en el suelo depende en gran medida del estado químico del metal. Las reacciones de los metales son rápidas durante la fase

inicial del contacto metal-suelo (minutos, horas). Como resultado, las consecuencias naturales incluyen las diversas formas químicas de los metales y su biodisponibilidad, movilidad y toxicidad variables. La distribución de metales en el suelo está influenciada por factores como reacciones de precipitación o disolución, intercambio iónico, adsorción y desorción, inmovilización de activación biológica y especies de plantas. No obstante, el valor del pH, que es uno de los parámetros que determina la especiación de metales en el suelo, influye en todos estos parámetros. El plomo (Pb), el cromo (Cr), el arsénico (As), el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el mercurio (Hg) y el níquel son oligoelementos que se encuentran comúnmente como impurezas en el suelo y para los cuales juega el valor del pH. En la figura 13 se detallan varios factores que influyen en los metales más representativos (Magdziak et al., 2015).

Figura 13

Consideraciones durante la fitorremediación para los metales más representativos



Nota: Adaptado de EPA **Fuente:** EPA., 2000.

1.3.1.6.4. Beneficios e inconvenientes de la fitorremediación

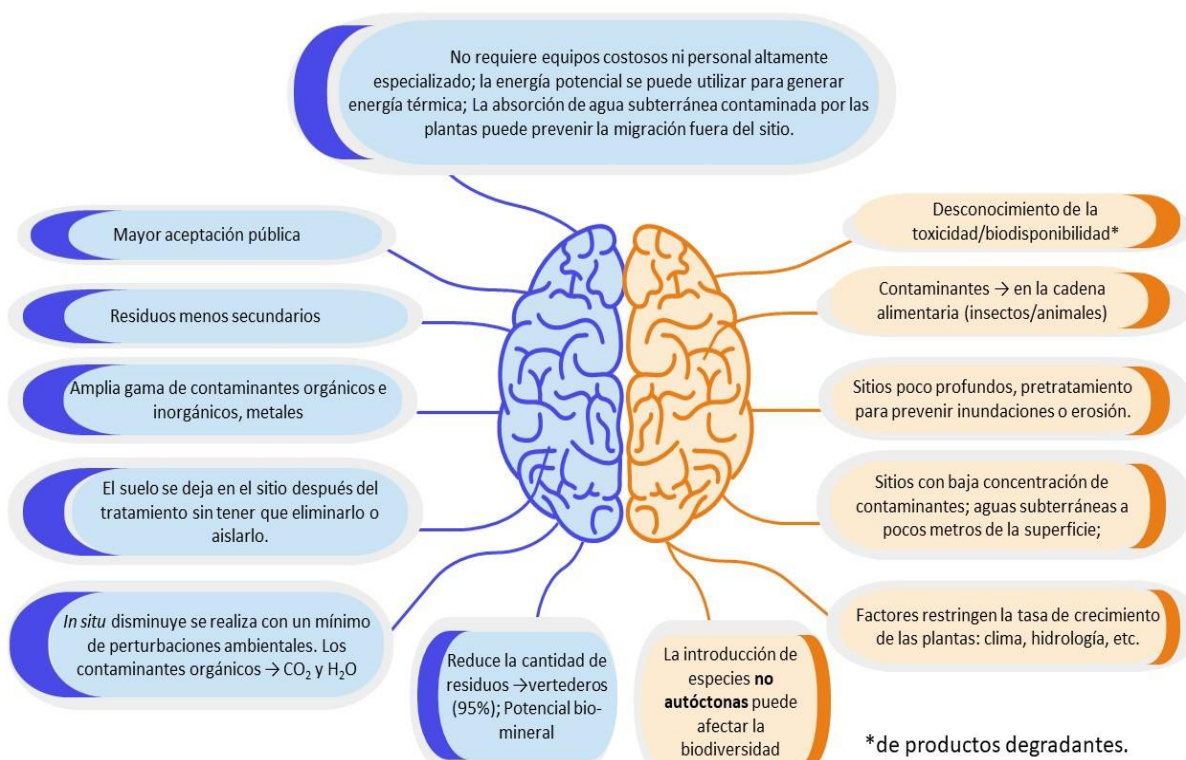
La fitorremediación, al igual que otras técnicas de rehabilitación, tiene ventajas e inconvenientes. La fitorremediación es más rentable, más respetuosa con el medio ambiente, más aplicable a una amplia gama de metales tóxicos y más agradable estéticamente. Sin embargo, la fitorremediación tiene algunas limitaciones. Es un proceso largo que puede tardar años en completarse y a veces se debe determinar si los contaminantes acumulados en las hojas y la madera se liberarán cuando las hojas caigan (Ram et al., 2018).

La fitorremediación de suelos contaminados será siempre una herramienta prometedora si no está ligada a la producción rentable de biomasa, además, requiere un enfoque multidisciplinario que combine el manejo de cultivos, el control de contaminantes, la evaluación de riesgos y la optimización económica. También, si es aceptada por los reguladores y los responsables de la toma de decisiones, podría ser una solución viable para utilizar y restaurar suelos contaminados. La fitorremediación de sitios contaminados podría proporcionar una fuente alternativa de ingresos para quienes perdieron sus trabajos debido a la contaminación (Evangelou et al., 2015).

La profundidad de los contaminantes limita el tratamiento y la profundidad de la raíz de la planta determina la zona de tratamiento. Por lo general, ocurre en suelos poco profundos, arroyos y aguas subterráneas. El bombeo de agua subterránea contaminada para regar las plantaciones de árboles puede tratar el agua subterránea contaminada a una profundidad considerable para que las raíces de las plantas alcancen, así que puede ser necesario un laboreo profundo para acercar los metales pesados a las raíces. El uso de árboles (en lugar de plantas más pequeñas) permite a los investigadores tratar la contaminación más profunda porque las raíces de los árboles penetran más profundamente en el suelo (Ram et al., 2018). En la figura 14 se muestra un resumen más detallado acerca de las ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Figura 14

Ventajas y Desventajas de la Fitorremediación



Nota: Ventajas (izquierda) y desventajas (derecha) de la técnica de fitorremediación de contaminantes **Fuente:** Ram et al., 2018.

1.3.1.7. Casos de estudio.

Tabla 2

Estudios de caso sobre la biorremediación de contaminantes emergentes

Tipo de contaminante	Técnica empleada	Resultados obtenidos	Referencias
Productos farmacéuticos: ciprofloxacina, ibuprofeno, diclofenaco y acetaminofén	Se evaluó el potencial de la especie vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) para eliminar del medio acuoso productos farmacéuticos utilizando espectrofotometría UV-Vis para leer en forma directa las absorbancias de cada producto.	<i>C. zizanioides</i> removió ciprofloxacina (98,3%) en un tiempo de 149h, seguido por ibuprofeno y diclofenaco con un máximo de remoción de 73,33% y sulfametaxazol con 66,53%, y para acetaminofén de 38,49% a las 192h.	(Checa-Artos, Sosa, Vanegast, Ruiz-Barzola y Barcos-Arias, 2021).
Plomo y Cadmio	Se evaluó el efecto de las enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost	La aplicación de las enmiendas orgánicas contribuye a solubilizar el Pb y Cd del suelo, además de contribuir en un mayor desarrollo del cultivo	(Munive, et al., 2020).
Metales pesados: cadmio y plomo	En base a una revisión de los trabajos realizados alrededor del mundo revisión se muestran las técnicas de remediación (fitoremediación y bioremediación) que han obtenido buenos resultados respecto a la limpieza de suelos contaminados.	La importancia que tiene la implementación de un sistema integrado de remediación de suelos que incluya la incorporación gradual de árboles nativos, plantas herbáceas, plantas acuáticas, biochar, bacterias y micorrizas arbusculares.	(Casteblanco, 2018)
Comportamiento fotosintético de plantas	Los componentes principales del agua se determinaron con test Nanocolor y los cambios fotosintéticos en las plantas durante la exposición al agua residual se determinaron por métodos espectrofotométricos	Así se puede concluir que la planta <i>E. crassipes</i> disminuyó la relación clorofila a/b como indicador de estrés, la planta <i>P. stratiotes</i> aumentó la relación carotenos/clorofila total aumentando la síntesis de carotenos para proteger los tejidos contra el estrés y la planta <i>S. auriculata</i> fue la menos afectada, lo que se traduce en una alta tolerancia o adaptación de	(Jaramillo, Marín & Ocampo, 2018)

Tipo de contaminante	Técnica empleada	Resultados obtenidos	Referencias
Metales pesados: mercurio, arsénico, plomo y cromo	Una alternativa para contribuir a la solución de este problema es el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados del suelo o “fitorremediación”.	esta última especie a los cambios ambientales.	
		Una alternativa para contribuir a la solución de este problema es el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados del suelo o “fitorremediación”. Una estrategia para mejorar el proceso de fitoextracción de metales es a través de la inoculación de microorganismos del suelo. Bacterias han mostrado resultados promisorios al ser empleados en estos tratamientos, así como el uso de hongos micorrízicos arbusculares específicamente del género <i>Glomus</i> .	(Covarrubias & Cabriales, 2017)

Nota: Fuente: Autores. 2023.

1.3.2. Herramientas biotecnológicas para promover la agricultura sustentable

1.3.2.1. Introducción

En la actualidad, la agricultura sostenible ofrece un suministro constante de alimentos, un medio ambiente sano, un rendimiento y una fertilidad del suelo sostenidos y un control natural de las plagas (Viera-Arroyo, 2020). Por lo tanto, su importancia se refleja en la evolución intelectual de los cultivos, que se utilizan para resolver problemas en diversas áreas de la producción y el procesamiento agrícola, como el fitomejoramiento para mejorar la resistencia a las plagas, los animales, aumentar el valor nutricional de los alimentos y las condiciones abióticas, que se producen a través de tecnologías autosostenibles para mejorar la agricultura (Hernández-Melchor, 2019). Según información de fuentes especializadas, se espera que la demanda de producción agrícola aumente en al menos un 70% para el año 2050, debido a que las prácticas agrícolas sostenibles son fundamentales para satisfacer las demandas agrícolas del mundo futuro (Barea, 2015).

Una aplicación tecnológica conocida como biotecnología hace uso de sistemas biológicos, organismos vivos o sus derivados para desarrollar o alterar bienes o procedimientos para usos particulares, que ofrecen posibles soluciones a los problemas de producción agropecuaria, agrícola, entre otras áreas (Morera, 2021), siendo usada con el fin de crear nuevo material de plantación de bajo costo y libre de enfermedades en los cultivos.

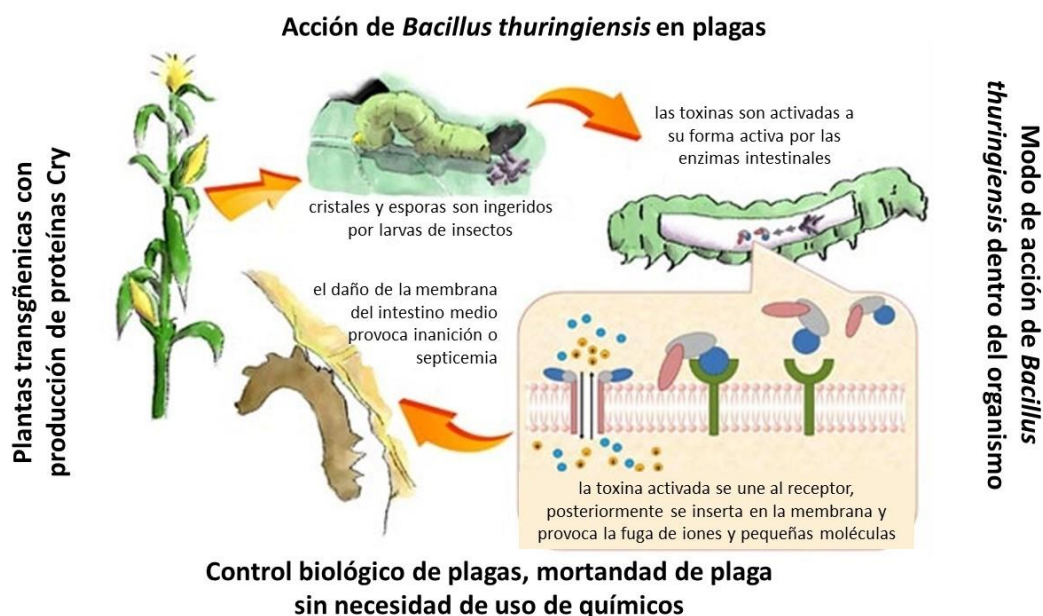
1.3.2.2. Microorganismos como control biológico en la agricultura

1.3.2.2.1. *Bacillus thuringiensis* como controlador biológico

Uno de los elementos del ciclo productivo donde los cultivos son necesarios a niveles económicamente aceptables a los daños causados por plagas es el manejo integrado de plagas y enfermedades (Bravo, 2019). *Bacillus thuringiensis* es uno de los microorganismos de importancia biotecnológica. Se distingue por su manejo biológico en el control de plagas en la invasión de fitopatógenos en larvas de lepidópteros, coleópteros, nematodos, ácaros y protozoarios en diversos cultivos, como maíz, papa, algodón y hortalizas, entre otros (ver figura 15).

Figura 15

Mecanismo de acción de Bacillus thuringiensis



Nota: Fuente: Bravo., 2019.

Esta bacteria tiene esporas similares a las de un bacilo, es Gram positiva, anaerobia facultativa y forma inclusiones cristalinas parasporales compuestas de proteínas Cry. Tiene acción biológica contra los insectos, especialmente para las larvas de muchos insectos e invertebrados (Kahn, 2021). *B. thuringiensis* serotipo kustaki HD1 es la cepa que se utiliza con más frecuencia para este fin.

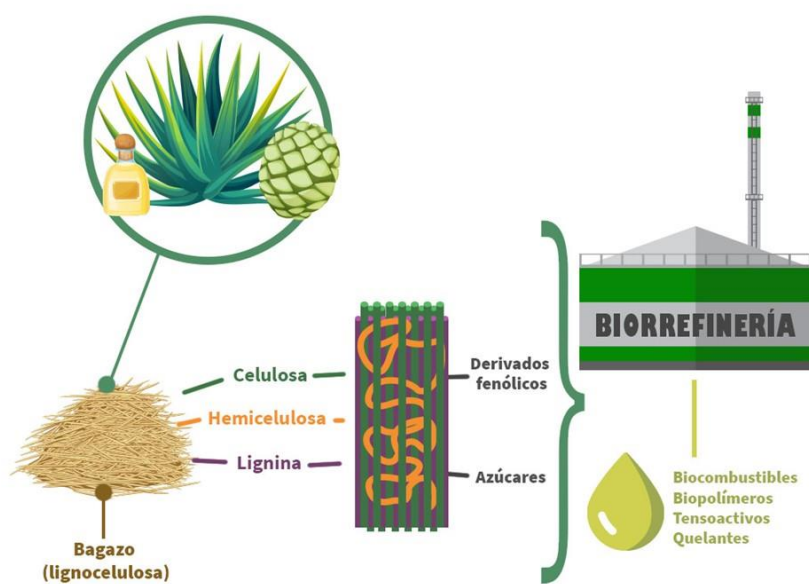
Debido a sus propiedades, que incluyen impedir e invadir el crecimiento de la germinación de esporas, crear una barrera física para evitar que los patógenos se asienten en la superficie de los tejidos vegetales, actuar como bioestimulante para el crecimiento de las raíces, fomentar la secreción de fitohormonas y mejorar la asimilación de agua y nutrientes, inducir a la planta a producir fitoalexinas y hacer que las plantas sean más resistentes a los ataques bacterianos y fúngicos (Viera-Arroyo, 2020).

1.3.2.2.2. *Trichoderma*: importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial

El hongo *Trichoderma* es un organismo global, y su importancia radica en su capacidad de adaptación y creación de metabolitos, incluyendo sustancias químicas volátiles, enzimas y otras sustancias con valor biotecnológico y ambiental (Barea, 2015). Debido a sus diversos modos de acción, que incluyen antibiosis, micoparasitismo, competencia por espacio y recursos, y la síntesis de metabolitos secundarios, este género se utiliza como agente de biocontrol contra hongos fitopatógenos. En sistemas de fermentación ligada sobre sustratos sólidos o en cultivos sumergidos, se han empleado varias especies de *Trichoderma* para descomponer residuos lignocelulósicos y producir combustibles alternativos como el etanol (ver figura 16). Como sistemas de fermentación, los biorreactores optimizan el entorno de cultivo para fomentar la producción de biomasa y metabolitos (Hernández-Melchor, 2019).

Figura 16

Productos de la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos



Imágenes: Shutterstock; diseño: Bárbara Castrejón, DGDC-UNAM

Nota: Fuente: Hernández-Melchor, 2019; Castrejón, 2021

1.3.2.3. Uso de los biofertilizantes en la agricultura sostenible

La función principal de las bacterias en los biofertilizantes, que son productos elaborados con microorganismos como los hongos, es potenciar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y en las plantas. Se emplean sobre todo en la agricultura ecológica y tienen beneficios como menores costes de producción, menor riesgo de contaminación ambiental, mayor fertilidad del suelo y mayor biodiversidad del suelo (Barea, 2015). Algunos de estos se describen en la Tabla 3.

Tabla 3

Tipos de biofertilizantes y su función

Tipo de fertilizante	Descripción	Fuente
<i>Azotobacter</i>	Este aporte permite fijar el nitrógeno en función de las sustancias biológicamente activas y de las necesidades, favoreciendo el crecimiento de las plantas y la resistencia a la floración y la fructificación, al tiempo que mejora la fotosíntesis. Además, acelera la germinación en un 40%.	Huamán-Castilla et al., (2021)
<i>Rhizobium</i>	Su principal objetivo es infectar las leguminosas y provocar el crecimiento de nódulos en las raíces que fijan el nitrógeno.	Cantaro-Segura, (2019)
<i>Micorrizas</i>	Este microorganismo intercambia nutrientes, agua y fomenta el desarrollo de compuestos que se defienden de los ataques del patógeno, lo que permite al hongo obtener de la planta los carbohidratos que no puede fabricar.	Rubio-Sanz et al., (2021)
<i>Fosforina</i>	Tienen una gran capacidad de producción de ácidos orgánicos, enzimas y otros compuestos. Además, tienen capacidad para solubilizar el fósforo del suelo y entregarlo a la planta.	Ortega et al., (2019)

Nota: Fuente: Autores de la tabla.

1.3.2.4. Nuevas tendencias biotecnológicas en el desarrollo de alimentos sustentables de próxima generación

1.3.2.4.1. Introducción

El mantenimiento y la conservación de los recursos naturales han ayudado al desarrollo humano y, en la actualidad, mantener estos recursos es una de las mayores dificultades a las que se enfrenta el mundo. Definimos la sostenibilidad como el uso adecuado de los recursos para satisfacer las necesidades actuales sin poner en peligro las demandas futuras, de forma coordinada y como complemento del progreso social. A nivel económico, social y ecológico, esta novedosa idea se ha convertido poco a poco en una necesidad social (Domínguez et al., 2019).

De igual manera el desarrollo y crecimiento científico y tecnológico, de manera específica en las ciencias de la vida, el cual se ha generado desde los años cincuenta, ha permitida aplicar los principios de ingeniería y científicos transformando materiales, remediar suelos, degradación de materiales contaminantes, o producción de bioenergías con acción de agentes biológicos (microorganismos, enzimas, micro algas, etc.) con la finalidad de otorgar a nuestra sociedad bienes y servicios. Existen diferentes actividades biotecnológicas que están enfocadas en el ambiente, esto con el fin de responder los restos en cuanto desarrollo socioeconómico sostenible, respetando al medio ambiente y la conservación y preservación de los recursos naturales (Domínguez et al., 2019).

Los avances que permiten desarrollar esta área también dependen de otras ciencias al igual que el conocimiento de otros materiales, lo cual se ha ido adquiriendo con el transcurso del tiempo, además de que la Biotecnología Ambiental ha ganado un papel importante en las diferentes actividades de la biotecnología. En nuestra sociedad es importante disponer de suelo fértil y adecuado el cual se ajuste a los diferentes usos y demandas de la actividad humana, por lo que de forma inherente existe un compromiso de calidad el cual engloba distintos tratamientos para eliminar o disminuir la contaminación causada por distintos factores, además de mejorar sus características. Se estima que alrededor de un 33% del suelo a nivel mundial sufre de contaminación lo cual en un futuro será un inconveniente debido al crecimiento demográfico de la población y la gran demanda que habrá en un futuro de recursos provenientes del suelo (Zwolak et al. 2019).

El requerimiento energético es necesario en varios ámbitos que rodean al ser humano, como lo son las domésticas, industriales, agrícolas, las ganaderas o incluso las que están relacionadas con la forma de pasar nuestro tiempo libre. La disponibilidad de energía es de suma importancia para el avance de la sociedad humana, debido a que se ha convertido en una necesidad para que

podamos subsistir de manera cómoda Debido al alto incremento de la población mundial y de brindar una mejor calidad de vida se ha logrado presenciar un escenario de crisis energética a nivel global, provocando que el uso de energía en base a fuentes fósiles se haya acelerado y evidenciando una disponibilidad adecuada, por lo que emplear o desarrollar energías renovables resulta una buena alternativa (Landera et al. 2020).

En cuanto Biotecnología Ambiental se refiere según Hernández (2022), se utilizan dos metodologías para la realización de los estudios:

1. Metodología basada en aislamiento de microorganismos de interés y caracterizar sus funciones metabólicas partiendo de un estudio en laboratorio realizando un cultivo puro. Una de las dificultades de esta metodología que muy bien se conoce es que muchos de los resultados obtenidos en el laboratorio no serán los esperados en un medio abierto, debido a que en el laboratorio se puede controlar muchos factores, no siendo lo mismo en un ecosistema, pero esto no quiere decir que esta metodología sea inservible, ya que esta limitación es solo una consecuencia de la complejidad de los consorcios microbianos y la interacción que estos tienen con el entorno del cual están rodeados.
2. Metodología basada en el análisis de consorcios microbianos tomándolos como una unidad fundamental, esta aplicación es más empírica más cuando no se tiene ningún conocimiento sobre el consorcio, pero no obstante esta metodología también presenta limitaciones como no lograr identificar las estructuras o grupos relevantes fisiológicamente.

Existen 5 ámbitos de aplicación de la Biotecnología Ambiental, en las cuales en años próximos podríamos observar grandes contribuciones, a continuación, nombraremos solo 2:

1. Energías alternativas: en este siglo se está tomando como objetivo de estudio a las energías renovables, tal como se mencionó con anterioridad. Uno de estos estudios son el uso de micro algas para producir biodiesel, el uso de las micro algas se debe a que estas pueden producir biomasa algal con un contenido elevado de lipídico, el cual puede ser aprovechado para la generación de biocombustible (Johnson, 2017). Muchas propuestas no han logrado superar las puertas del laboratorio o como mucho solo se realizan ensayos piloto, sin embargo, han presentado sucesos interesantes uno de ellos es la síntesis de nitrógeno.
2. Recursos hídricos: Las sociedades actuales deben utilizar y gestionar el agua con eficacia si quieren desarrollarse social y económicamente. El crecimiento económico y la demanda de agua están estrechamente relacionados, mientras que los recursos hídricos son también un factor clave. Por ello, mantener la calidad del agua potable, el saneamiento de las aguas residuales y su posible regeneración resulta cada vez más

difícil. La recuperación de acuíferos o la provisión de recursos hídricos alternativos en el suministro de agua potable para actividades recreativas e industriales son dos ejemplos de cómo la regeneración del agua es un factor medioambiental muy esencial y estratégico en muchas regiones (Jofre, 2017).

1.3.2.5. Estudio de caso en la agricultura sostenible

1.3.2.5.1. Soberanía alimentaria bajo el contexto de la agricultura 4.0 y la biotecnología en América Latina.

Partiendo del hecho que la soberanía alimentaria es el derecho de las personas para alcanzar la autosuficiencia de alimentos sanos y culturalmente apropiados de forma estable (Santafe y Loring, 2021). Uno de los indicadores de insostenibilidad de la soberanía alimentaria es el hambre, considerado como uno de los desafíos más relevantes que enfrenta la humanidad, que lejos de acercarnos a una solución verdadera, los índices marcan una tendencia en ascenso de este fenómeno mundial (FAO, 2020). En este sentido, en América Latina existe altos niveles de hambre, que se puede explicar por diferentes razones como el acceso mercantil limitado y los altos costos, hechos que se traducen en un 10% de las personas con inseguridad alimentaria en la región (Flores 2020, 6). Irónicamente, en América Latina existe una abundancia de alimentos respecto a otras áreas geográficas, que se evidencia con los volúmenes de exportaciones a mercados internacionales (Flores 2020, 6), que encarece el precio de los alimentos en los mercados internos de los países exportadores (FAO, 2020).

Otro hecho que agudiza este desafío es que, aproximadamente un tercio de los alimentos se pierde o se desperdicia no solo en los hogares o centros comerciales, sino también hay desperdicios en el periodo de siembra hasta la cosecha; por lo expuesto previamente, se evidencian varios factores que afectan la soberanía alimentaria, con una importante afectación sobre el ambiente y pérdidas económicas (Gaudreau 2018, 10-11). Esta triada de la sustentabilidad se ve seriamente comprometida, que lleva a plantearnos alternativas emergentes, por ello en este ensayo se busca desarrollar una respuesta a: ¿Es posible alcanzar una soberanía alimentaria mediante la implementación de principios basados en la agricultura 4,0 y la biotecnología?, con particular énfasis en contextos de Ecuador y la región.

Entre las alternativas emergentes para dar respuesta a esta problemática alimentaria, se tienen opciones como: la optimización de sistemas de saneamiento, el desarrollo agrícola 4.0, los avances biotecnológicos, al igual que el refuerzo de la educación en todos los niveles (Vélez-Rolón et al. 2020, 106-109). Por la importancia, formación como ingeniero en Biotecnología Ambiental y nivel de profundidad requerido, se ha seleccionado únicamente dos áreas: el

uso de la biotecnología y la agricultura 4.0, evaluando sus limitaciones y potencialidades.

Conscientes de que la biotecnología abarca el uso de organismos vivos o sistemas biológicos en procesos industriales y plantas de tratamiento de residuos (Gupta et al. 2017, 1-21). La biotecnología permite el mejoramiento de alimentos, la valorización de los residuos generados por las personas como una alternativa eco-amigable con el fin de reducir y aprovechar la biomasa (Barcelos et al., 2018). El aporte de la biotecnología radica en su versatilidad en diferentes áreas, que no se ve limitada al procesamiento de alimentos (Hurtado et al. 2019, 902- 920), sino también la mejora genética, producción de transgénicos, incluso la valorización de subproductos y restos alimentarios (Zhang et al. 2022, 140-150). Lo que permite su aplicabilidad al cumplir varios de los principios de la soberanía alimentaria, protección de recursos naturales, eliminar la globalización del hambre (Pachon, 2018) de un país, desde alimentos modificados genéticamente, mejoramiento o resistencia ante factores ambientales que limitan la eficiencia de los cultivos como las sequías, las plagas, al igual que la posibilidad de tener mayor cantidad y mejor calidad de productos agrícolas y ganaderos en un área limitada. Por ejemplo, la carne producida sin necesidad de animales o carne in vitro es sin duda uno de los avances más importantes de la biotecnología, ya que estos análogos cárnicos buscan parecerse a la carne tanto en textura, sabor, aporte de nutrientes, grasas, etc. (Barreiro 2022, 32- 44).

Entre los beneficios de esta carne artificial: proviene del cultivo de tejidos con células en el laboratorio, procurando reducir su impacto en el ambiente (Ferreira et al., 2022), puesto que las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente metano, se verían seriamente reducidas, implicando cargas evitadas a la atmósfera; permite al mismo tiempo la preservación de la tierra y los cuerpos hídricos que se emplean para el ganado, lo que permite destinar dichos espacios en la conservación de recursos naturales u otras actividades (Post 2014, 1-2), evitando una de las prácticas más recurrentes en América Latina, la expansión de la frontera agrícola.

Por otro lado, este tipo de carne reduce al máximo la exposición a las enfermedades características de los animales, como la peste porcina, la fiebre aftosa, enfermedad de las vacas locas, entre otras (Bonny et al. 2015, 255–260). Finalmente, los componentes nutricionales pueden ser personalizados de acuerdo con los requerimientos nutritivos de ciertas poblaciones, por ejemplo, aumentar el contenido de ácidos grasos polisaturados para reducir el colesterol (Post, 2014, 1-2), estas características resultan particularmente interesantes para personas que están en un centro de salud donde se podría alcanzar con los estándares de condiciones de asepsia y dieta de los pacientes.

En contraste a lo expuesto, el procedimiento de elaboración de este tipo de carne sintética todavía presenta varias desventajas, como su alto coste de producción,

valores que deben ser asumidos por el consumidor final (Chriki y Hocquette, 2020). De igual manera, otra limitante es la no obtención de un sabor y textura tan apetecible como el de la carne convencional por algunas marcas comerciales. Cabe enfatizar que, desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, la carne in vitro aún sigue siendo cuestionada, uno de los argumentos se base en si un cultivo de carne llegase a infectarse con cualquier patógeno, sería difícil responder de forma eficiente ante un problema de salud de este tipo. Finalmente, la aceptación de este tipo de productos por parte de la sociedad es limitada, porque los consumidores prefieren los animales y las plantas cultivados de forma natural (Zhang y Bai, 2020).

Por otro lado, la Agricultura 4.0 hace referencia a la cuarta revolución agrícola, la cual presenta una intervención tecnológica sobre la producción de alimentos, esta innovación muchas veces se la asocia a una solución al mejoramiento del crecimiento agrícola, permitiendo un mejor control económico sostenible; sin embargo es necesario enfatizar en el impacto brusco de los métodos manuales o impulsados por animales, que se han ido reemplazando por tecnologías automatizadas (Rose y Chilvers, 2018), que implican el uso de inteligencia artificial, monitoreo de los cultivos desde cualquier parte del mundo. Sin lugar a duda, los métodos en la agroalimentación se han ido transformando, fortaleciendo los sistemas de precisión e intervenciones en la agricultura, con el procesamiento analíticos de datos con información recopilada o transmitida a través de tecnologías avanzadas, evidenciadas en granjas conectadas, los equipos actuales agrícolas, nuevos métodos e implementos para mejorar la productividad, calidad y eficiencia con protección a la alimentación (Barrett y Rosal 2020, 162-189) (Qaim, 2017).

Asimismo, se evidencia una mayor productividad, gracias a la reducción de costes y el mejor uso de recursos, esto también apoyado por la mejor toma de decisiones que son adaptadas a las necesidades de cada plantación, decisiones que se toman en base a datos, se cree que la agricultura 4.0 contribuye en la disminución del impacto ambiental, por el manejo más eficiente de los recursos naturales (da Silveira et al. 2021, 189).

Sin embargo, existe una gran heterogeneidad de las tecnologías empleadas en la agricultura 4.0, porque los nuevos avances tecnológicos en esta área en su mayoría son patentados por transnacionales que están optimizando su cadena de producción, lo que deja a la deriva a pequeños campesinos y muchos grupos sociales; sin un apoyo sustancial al desarrollo de los pequeños agricultores, permitiendo así que países con mayor poder adquisitivo desarrollen de mejor manera la agricultura 4.0 (da Silveira et al. 2021, 189), y marcando la brecha de una manera más intensa en países del Sur Global.

Un punto en el que confluye la biotecnología y la Agricultura 4.0 es la producción de fertilizantes que, si bien ha sido fundamental para alimentar a la población

mundial, por cuanto el 30 % al 50 % del rendimiento de los cultivos es atribuible a los aportes de fertilizantes en las regiones templadas y su contribución es mucho mayor en los climas tropicales. Lo que ha generado una dependencia de los productos, por consecuente una monopolización de un número muy limitado de empresas, que se ve ligado a la revolución verde, desequilibrando las dosis de insumos, los balances de energía, pesticidas y agua (Marchiol 2019, 183-190).

El aumento de las opciones alimentarias, una mejor nutrición y la seguridad alimentaria son algunas de las promesas de la agricultura 4.0, pero también ha dado lugar a cosas como los derechos de propiedad intelectual sobre el ganado y los cultivos, las fusiones cruzadas entre semillas y pesticidas y la falta de competencia del sector público (Klerkx y Rose 2020, 24). Además, los fertilizantes convencionales que tienen una baja eficiencia de absorción de nutrientes y, a menudo, se asocian con grandes pérdidas para el medio ambiente y las consiguientes consecuencias negativas (Migliorini et al. 2020, 162-163).

Por otro lado, el punto clave de la fertilización de cultivos es evitar pérdidas de nutrientes y sincronizar la disponibilidad de nutrientes con su absorción por los cultivos. Justamente, implementar nanofertilizantes como materiales inteligentes va a permitir detectar y reaccionar cambiando su forma o comportamiento a través de influencias externas, que incluyen presión, temperatura, humedad, pH y campos eléctricos y magnéticos (Marchiol 2019, 186-190). Con sus propias políticas y estrategias sostenibles de producción, distribución y consumo de alimentos centradas en la pequeña y mediana producción y no en el agroextractivismo, estas tecnologías de cuarta generación ayudarían a mantener la soberanía alimentaria (Van den Berg, et al., 2017). Cabe señalar que una alternativa interesante a estos fertilizantes convencionales son los biofertilizantes que tienen un gran potencial en América Latina, al igual que los bioplaguicidas (Mahanty et al. 2016, 3315–3335).

En este sentido, aplicando lo expuesto a nuestro contexto, Ecuador ha sido uno de los principales países con deficiencia en la aplicación de los principios de la soberanía alimentaria; sin embargo, desde el año 2008 se ha notado un esfuerzo por investigar, analizar y comprender la soberanía alimentaria (Vergara-Romero et al. 2020, 498-510). Asimismo, en el año 2013, Ecuador reconoció el rol de pequeños y medianos productores que aportan aproximadamente el 70% de alimentos consumidos en el país, además que se planteó como derecho de elegir su propio sistema agroalimentario con fin de continuar el desarrollo local (Parraguez et al. 2018, 330-341).

Finalmente, la agricultura 4.0 y la biotecnología a pesar de las limitaciones que presentan, tienen ventajas interesantes en el marco de la contribución de la soberanía alimentaria, puesto que representa un menor gasto energético y mayor eficiencia para nuevos emprendedores a baja y media escala (startups),

con el propósito de brindar oportunidades a más personas hacia una soberanía alimentaria independiente de transnacionales y grupos de poder. Los países latinoamericanos en general no han estado preparados para las diversas revoluciones industriales, tecnológicas y agrícolas.

1.3.3.Herramientas biotecnológicas en el desarrollo de la Biotecnología Ambiental

1.3.3.1. Aplicaciones para la mitigación del impacto ambiental generado por la actividad petrolera

1.3.3.1.1. Introducción

La actividad petrolera es un problema constante que atraviesan varios países, donde las extracciones conllevan a varios problemas ambientales afectando así la vida de los ciudadanos y su ecosistema, por tal razón se necesitan nuevos métodos que reduzcan estos impactos negativos al ambiente (Ramos Armella, 2023). Además de los impactos en las matrices de suelo, aire, y agua (Andrade, Lara-Basantes, Muñoz, Chicaiza-Ortiz, 2022), también se tiene afectaciones sobre los organismos vivos incluido el ser humano. En la búsqueda de alternativas para la biorremediación ambiental se han desarrollado estudios de fitorremediación (Mera & García, 2023), bioaumentación (Veloz, et al., 2015), landfarming (Kim, 2022), y la combinación de estas técnicas (Quillca Aldazabal & Rojas Ariza, 2022). En este sentido uno de los gases de efecto invernadero más estudiado, es el dióxido de carbono (CO_2), podría ser empleado para la recuperación mejorada de petróleo debido a su solubilidad en el petróleo crudo que se incrementa con un aumento de la presión (Tong et al., 2018). En los últimos años se han desarrollado técnicas de captura y utilización de carbono basados en procesos biológicos (microalgas, archaea, etc), procesos de geingeniería (captura directa en fuentes de emisión de CO_2 , inyección en océanos, criogenización, etc) (Soares, et al., 2023).

En los yacimientos, el CO_2 puede disolverse en el petróleo crudo para expandir su volumen, reducir su viscosidad y la tensión interfacial entre el petróleo y el gas, provocando así, una movilidad del petróleo crudo (Jin et al, 2017). El dióxido de carbono ha tomado relevancia para la recuperación mejorada de petróleo porque tiene un potencial para aumentar la recuperación final de las reservas de petróleo convencional, que puede reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la captura de CO_2 en las formaciones geológicas subterráneas (Massarweh y Abushaikha, 2021).

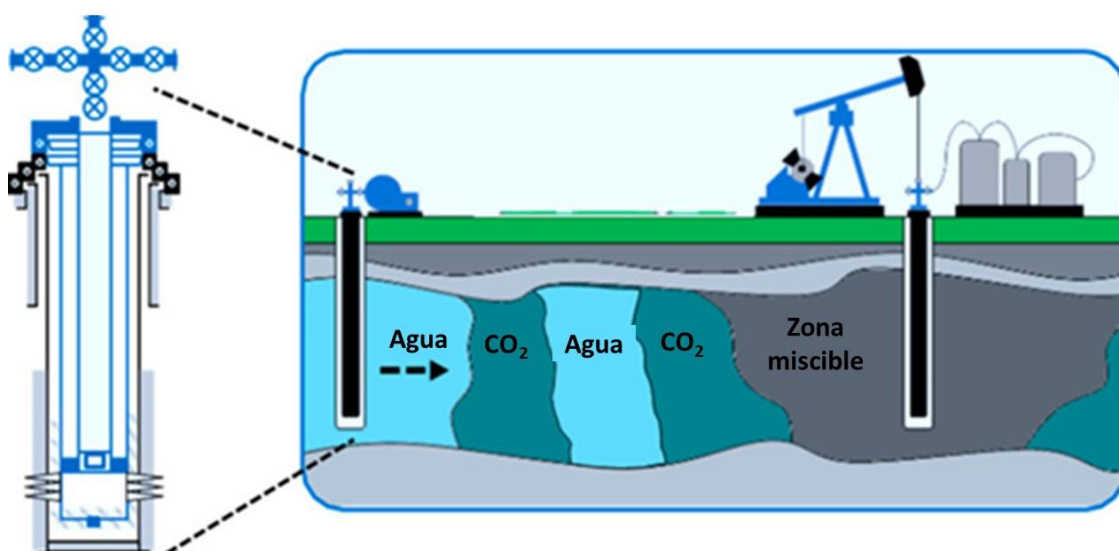
1.3.3.1.2. Técnicas de Inyección de CO₂ en Reservorios Subsuperficiales

Existen varias técnicas que permiten el desplazamiento del petróleo crudo de un yacimiento por CO₂. Este es un proceso complejo que incluye transferencia de masa, fuerzas capilares y efectos gravitacionales. Por otra parte, las condiciones de saturación del fluido en el yacimiento y recuperación previos tendrán impactos significativos en los procesos de petróleo adicional con la aplicación de CO₂. En el presente texto, se abordarán en particular dos métodos por inyección de CO₂ en reservorios subterráneos, que son usados para controlar la movilidad de CO₂, para aumentar la recuperación de petróleo y para promover la disminución de los problemas ambientales por actividades petroleras (Grasso, 2019).

Inyección alternada de agua y gas (WAG)

Figura 17

Diagrama esquemático del desplazamiento de petróleo en un yacimiento por inyección de CO₂ con gas alternante de agua



Nota: Fuente: Al-Shargabi et al., 2022.

Este método consiste en la combinación de una inyección de gas de CO₂ con una inyección de agua convencional. El mecanismo tiene características que son aplicadas en sustancias miscibles o inmiscibles que sirven para el desplazamiento del CO₂ (ver figura 17). Cuando se realiza un desplazamiento miscible resulta una mayor eficiencia de la captación de aceite en comparación con las condiciones inmiscibles, sin embargo, este método implica un aumento en la resistencia de la filtración trifásica en la formación (Al-Shargabi, 2022). No obstante, la posibilidad de utilizar el desplazamiento inmiscible con CO₂ es menos efectivo, pero tiene menores costos de proceso y menores presiones de inyección (Fakher, 2020). Sin embargo, es un método que tiene varias

limitaciones en los equipos y tecnologías para alternar el bombeo de agua y gas de manera cíclica en volúmenes grandes de pozos de inyección (Massarweh, 2021).

Polímeros aditivos para el espesamiento directo de CO₂

Los polímeros son aplicados como espesantes de CO₂. Estos deben disolverse completamente en el gas según las condiciones del yacimiento y lograr la viscosidad deseada del fluido introducido (Leimare et al, 2021). Según Zhang et al., (2021), existen dos tipos de polímeros utilizados para espesar la viscosidad del CO₂. Están los polímeros de alto peso molecular como el polidimetilsiloxano (PDMS) y el polivinilacetato (PVAc) y también se encuentran los polímeros de bajo peso molecular como el polivinil-etil-eter (PVVE) y poli-1-deceno (P1D). Este método promueve la movilidad del CO₂ con un aumento directo de la viscosidad. Además, los polímeros son capaces de disolver el CO₂ formando soluciones monofásicas y termodinámicamente estables, optimizando así la densidad y la viscosidad del fluido inyectado. Sin embargo, este método tiene una limitación y es que cuando aumente el tiempo, provocara pérdida o reducción en la solubilidad. Para asegurarse de que el método tenga condiciones adecuadas se debe observar las presiones que sean predominantes en el yacimiento (Lemaire et al., 2021)

Inundación del depósito de CO₂ mejorado con Nano Partículas

Las nanopartículas (NP) son excelentes para penetrar y movilizarse con una mayor agilidad por los espacios porosos y los canales de flujo dentro de las formaciones de los yacimientos de petróleo (Ab Rasid et al., 2022). Agregar NP a la espuma tensioactiva tiende a facilitar la estabilidad de la espuma y no se ven afectadas por algunas condiciones características que se encuentran en los yacimientos de petróleo. Algunos ejemplos de estas características pueden ser las altas temperaturas y la presencia de una variedad de hidrocarburos y/o sales. Otra gran ventaja de las NP es que, debido a su tamaño pequeño, no afecta el flujo del yacimiento a través de los medios porosos y estos no se ven obstaculizados físicamente, además, generan cambios mínimos en la permeabilidad de la formación (Yu y Kang, 2022).

- Problemas asociados con la retención de NP en un yacimiento

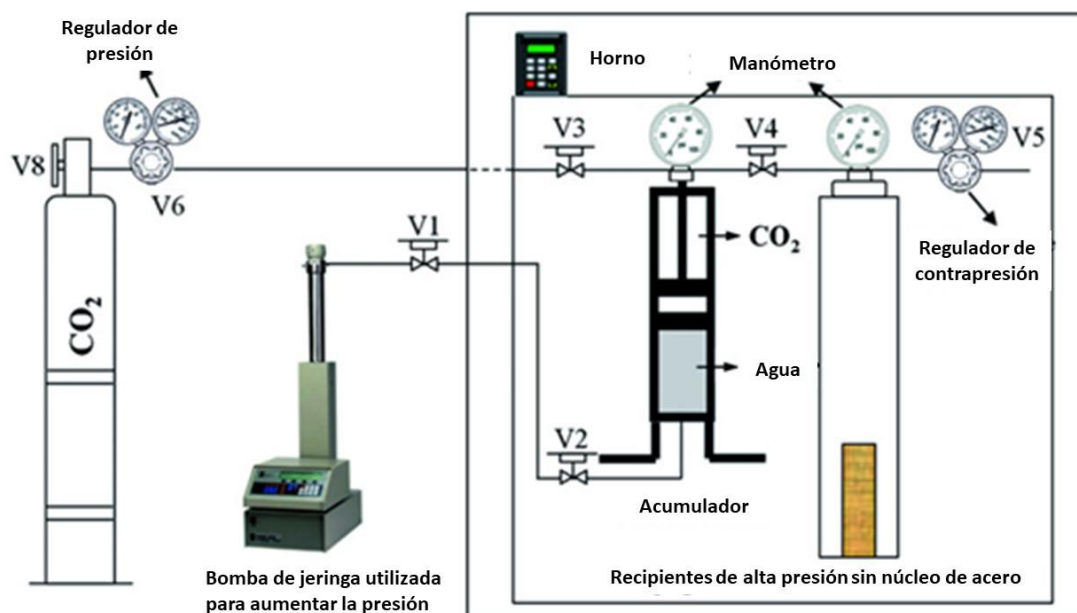
Los tensioactivos combinados con nanopartículas (NP) pueden tener algunos problemas que dificultan los métodos para la movilidad del petróleo. Algunos de estos problemas son el bloqueo de poros, que puede ser originado por dos mecanismos: taponamiento mecánico y contrastes de permeabilidad de fluidos (Yang et al., 2020). El desplazamiento descontrolado provoca que las partículas en los poros estrechos conduzcan a una retención de NP, que suelen acumularse debido a la adsorción y la interacción de la superficie transitoria, y así de esa manera, en los sitios de la superficie disponibles, se acumularán

partículas cargadas. Es importante mencionar que la retención de NP suele reducirse cuando la medida aumenta la permeabilidad de los medios porosos (Zhang et al., 2021).

1.3.3.1.3. Dióxido de carbono (CO₂) con Huff-n-Puff (HnP)

Figura 18

Esquema de la configuración para los experimentos de CO₂ HnP



Nota: Fuente: Li et al., 2019.

El CO₂ con Huff-n-Puff (HnP) es una técnica que mejora la recuperación de petróleo (Li et al., 2019). Se debe tener en claro que existen dos tipos de inyección de CO₂ que consisten uno en la inyección clásica de CO₂ y el otro en la inyección huff-n-puff (HnP) (ver figura 18). Este último ocupa un pozo como pozo de inyección y pozo de producción para evitar la penetración de gas, se conoce que existen tres etapas conocidas como: etapa de inyección de gas, etapa de remojo del pozo y etapa de producción (Choi et al., 2013). Después de la realización del proceso se debe producir el petróleo bajo el control del pozo, este es un método económico, rápido y eficaz, debido a que se puede aplicar a los yacimientos de petróleo que tiene una baja productividad natural y una baja efectividad de agua.

1.3.3.1.4. Modelado de CO₂ -LPG WAG con deposición de asfaltenos

Según Hao et al., (2021), el proceso de inhalación de CO₂ es un método eficaz para mejorar la recuperación de petróleo, pero su utilización se ve afectada por reservorios heterogéneos de agua de borde debido a una severa canalización de agua.

Este trabajo recopiló algunos de los métodos actuales que podrían ser una alternativa viable y eco amigable para una recuperación y posterior extracción de petróleo en los yacimientos, donde la principal tecnología podría ser la utilización de dióxido de carbono debido a su solubilidad y su aumento mediante inyección de presión, estas alternativas son positivas para mitigar los impactos ambientales.

1.3.3.1.5. Mecanismo de estimulación y secuestro de fracturamiento sin agua de CO₂ para reservorios continentales de petróleo compacto

La fracturación con CO₂, usa CO₂ como fluido de fracturación reemplazando al agua (Liu et al., 2014), se divide en dos etapas: la etapa de fracturamiento (suele durar 2 h) y la etapa de remojo (suele durar 3 a 14 días) (Tao et al., 2021). Se usa en el petróleo de arenas compactas que son yacimientos de baja porosidad y permeabilidad, donde la acumulación de petróleo crudo se produce en rocas generadoras, arenas compactas o intercalaciones de carbonato, sea libre o atrapada, sin movimiento de larga distancia (Zou et al., 2013).

Las reacciones con la roca del yacimiento y el fluido de formación de la fracturación con CO₂ pueden aumentar la porosidad y la permeabilidad de los yacimientos mejorando la fluidez del crudo. Esto permite yacimientos petrolíferos en depósitos continentales compactos con recuperación mejorada de petróleo (EOR), secuestro de CO₂ y conservación del agua. En comparación con técnicas de CO₂-EOR (CO₂ huff and puff y CO₂ flooding) donde el CO₂ interactúa con la roca y el fluido del yacimiento a mayor presión durante la fracturación resultando en la estimulación y secuestro de CO₂ (Tao et al., 2021).

Para constatar lo teórico se realizaron experimentos para investigar sistemáticamente los mecanismos de interacción de CO₂-roca y CO₂-petróleo durante la fracturación con CO₂ en yacimientos continentales de petróleo compacto bajo condiciones de alta presión. Primero, se realizaron imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM), pruebas de adsorción de nitrógeno y tomografía computarizada (CT) para investigar la interacción entre el CO₂ y la roca del yacimiento. Después, las interacciones entre el CO₂ y el aceite se investigaron mediante pruebas de tubo delgado y experimentos de disolución de CO₂. Mediante experimentos de desplazamiento del núcleo se comparó el efecto EOR entre la inundación de CO₂ y el CO₂ fracturado. Todo se llevó a cabo en condiciones de alta presión. Finalmente, se realizaron pruebas de campo para verificar el efecto de la fracturación por CO₂ (Tao et al., 2021).

Los experimentos de desplazamiento del núcleo indicaron que la recuperación de petróleo del proceso de remojo de CO₂ después de la fracturación con CO₂ es del 36 %, que es un 12 % y un 9 % más alto que los de CO₂ huff and puff y CO₂ flooding con 5 poros de volumen, respectivamente. Las pruebas de campo muestran que la producción promedio de petróleo después de la fracturación con

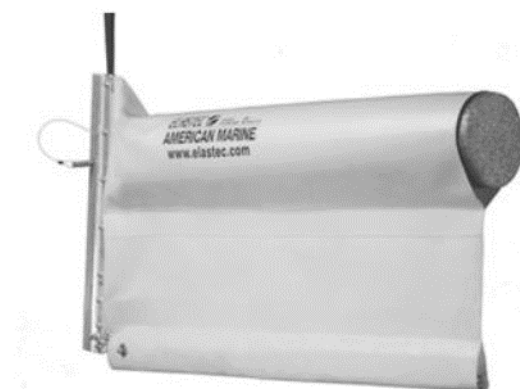
CO₂ es 1,42 veces más alta que después de la inundación con CO₂ (Tao et al., 2021).

1.3.3.1.6. Tecnologías recientes para mitigar los accidentes por vertidos de petróleo

Barreras petrolíferas

Figura 19

Pluma de contención clásica rellena de espuma



Nota: Fuente: Assad & Banihani., 2017.

Una barrera se compone de un dispositivo flotante (tubo inflable) y de un faldón flexible sumergido (Figura 19). En la parte inferior una cadena permite pesar verticalmente sobre la falda y atraer la tensión longitudinal de la misma (Muttin, 2016). Las barreras de contención flotantes se dividen en dos grupos: barrera de aire, son burbujas que salen para crear una pared de gas, y barrera física flotante de varios tipos, como el cuerpo flotante (por encima del nivel del agua), la barrera subacuática, el refuerzo longitudinal (cadena, cuerda de acero, banda de poliéster) y los elementos de conexión para la conexión y la posición vertical de la barrera flotante (Justin y Sokovic, 2011). Los materiales usados en la fabricación son caucho o cloruro de polivinilo (PVC), al añadirle poliuretano termoplástico (TUP) se obtiene una barrera petrolífera de PVC/TUP que es ligera, muy estable y no requiere ningún sistema de inflado, con volumen reducido para su transporte, sencilla y rápida de desplegar con una alta resistividad al petróleo (Assad y Banihani, 2017).

Nuevos sorbentes

En la fase de limpieza, cualquier material poroso es capaz de absorber el aceite del agua y asegurarlo en su interior, como la arena, pero debe ser adecuado para usarse en el agua (hidrofóbico). El material óptimo sería la hidrofobización de fibras de poliéster no tejidas con copolímeros de poli (metilhidro-dimetil) siloxano para producir absorbentes repelentes al agua para la limpieza de derrames de petróleo (Corneliu, Lucia, Samoila y Harabagiu, 2017). Los

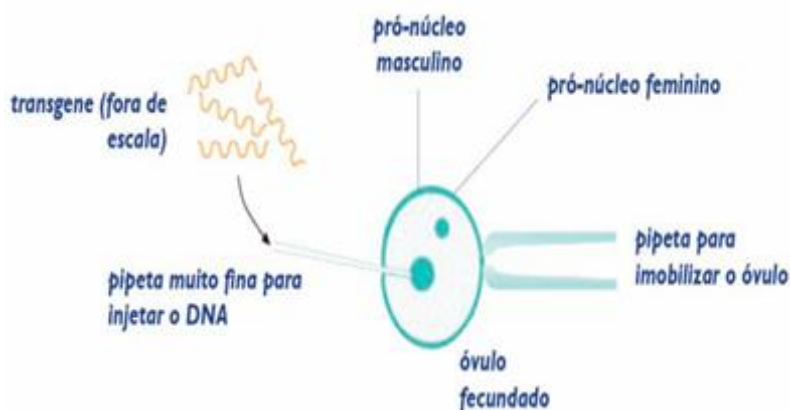
sorbentes hidrofóbicos producidos se caracterizaron y probaron para la absorción de petróleo en baño de aceite puro y agua y las pruebas de centrifugación se demostraron una alta capacidad de reciclaje de los sorbentes no tejidos gastados (Corneliu, Lucia, Samoila y Harabagiu, 2017). Existe otra sustancia lipofílica con capacidad de absorber aceite, en donde se preparan sorbentes atraídos por el aceite a base de propoxilato de glicerol mediante polimerización a granel (Kizil y Hayal, 2017).

1.3.3.2. Herramientas biotecnológicas y sus aplicaciones en la producción de nuevas fuentes de energía sustentable

1.3.3.2.1. Transgenia-Microinyeccion

Figura 20

Microinyeccion



Nota: Adaptado de EIBE **Fuente:** EIBE, 1998.

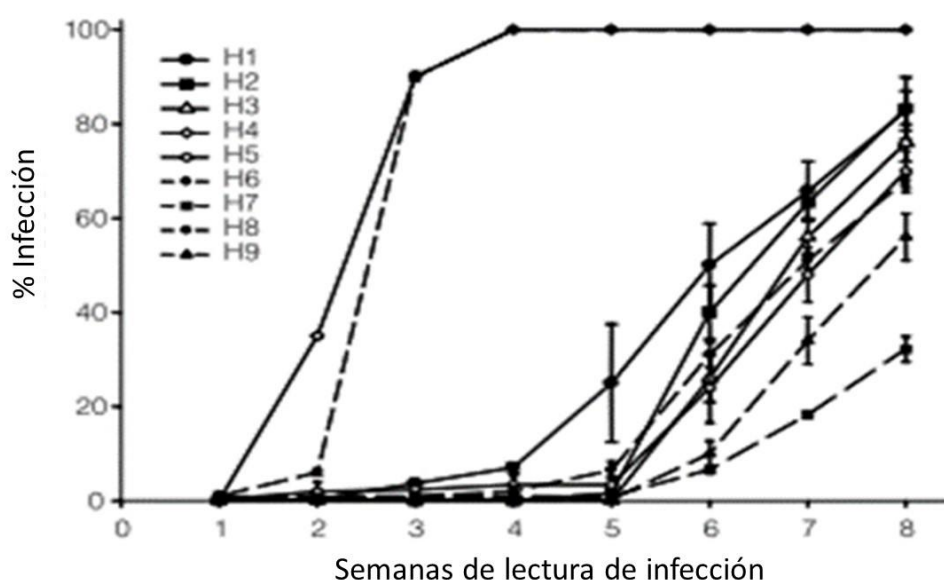
La transgénesis es la modificación del ADN usando diferentes tipos de genes, sean rasgo de un gen animal o planta, los cuales son insertados dentro de una célula animal o planta (Figura 20), en algunos casos utilizando el proceso de micro inyección, que consiste en la realización de un proceso muy meticuloso en el cual se utiliza micro agujas para la inserción de una sustancia en una célula viva (Garvin et al., s. f.).

La transgénesis es muy utilizada en áreas científicas para la modificación de su ADN tanto en la agricultura como la ganadería, en una de las investigaciones la Transgenia-Microinyeccion fue aplicada en la introducción de ADN directamente en el pronúcleo, donde se agrupó huevos de animales que han sido superovulados y fertilizados en vitro, que es una técnica donde se mantiene la fecundación fuera del organismo vivo, se utilizó una micro pipeta ultra fina de vidrio para inmovilizar el ovulo fertilizado, con ayuda de otra micro pipeta extremadamente fina que fue utilizada para la inserción de una sustancia la cual lleva varias copias de ADN exógeno. Estos huevos se introducen quirúrgicamente en las trompas de Falopio de hembras pseudo embarazadas

(dos Santos Lopes et al., 2019) con la introducción de ADN directamente en el pronúcleo de un ovocito recién fertilizado pero su mayor parte hablando en porcentajes hablamos de un 30% en oocitos (óvulos secundarios haploides) que son las células germinativas femenina, los oocitos primarios inician la meiosis pero se detienen en el estadio diploteno hasta la ovulación (Gomes-Filho et al., 2020) donde se manipula el ADN exógeno integrándose al genoma y los embriones, la micro inyección es una de las principales técnicas utilizadas para la producción de animales transgénicos a un que solo una pequeña parte de los animales son portadores del gen o se expresan y son suficientemente detectables. Los animales poseedores del gen pueden aparearse con animales no transgénicos para producir crías heterocigóticas (Aa) y aparearse entre sí para tener animales homocigotos (AA) para el gen exógeno (dos Santos Lopes et al., 2019).

Figura 21

Curvas de progreso de la enfermedad. h4, clon de katahdin que no adquirió la transgenia; H6, variedad Katahdin sin transforma



Nota: Ver identidad del resto de los clones en Materiales y Métodos **Fuente:** Lozoya-Saldaña et al. 2010.

Además, la transgénesis se ha utilizado en varias regiones del mundo. Para desarrollar resistencia contra el culpable del tizón tardío del tomate y la patata, *Phytophthora infestans* Mont. De Bary, se utilizó la transgénesis en plantas del Valle de Toluca (México). Queríamos mejorar la genética de la patata utilizando una especie de planta silvestre del valle llamada *Solanum bulbocastanum*, por lo que creamos un híbrido somático entre *S. bulbocastanum* y *S. tuberosum*. México está considerado como el segundo centro de variación de las especies de *Solanum*, un género de plantas herbáceas, arbustivas o trepadoras, donde varias de las especies de *Solanum* han desarrollado genes de resistencia al

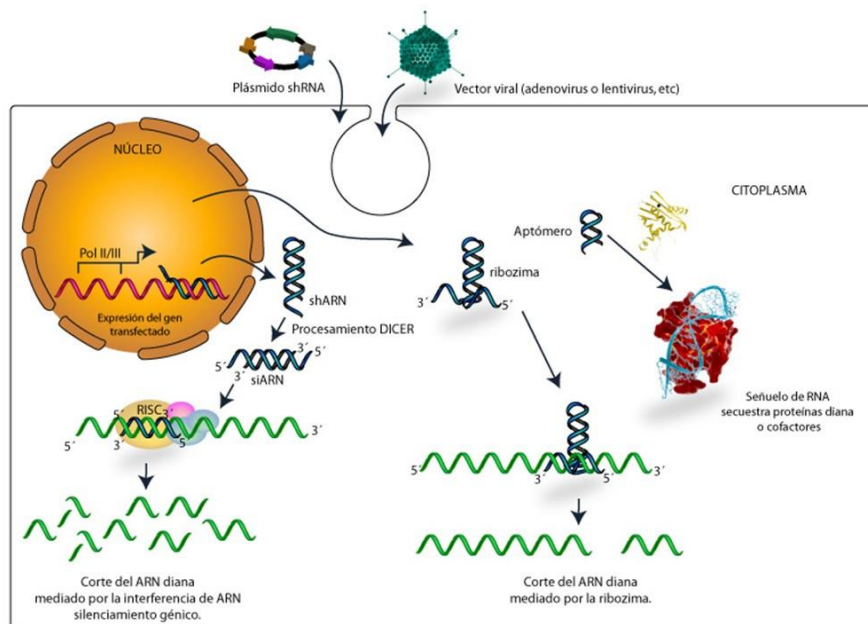
convivir con el patógeno causante del tizón tardío. Se exponen los diferentes clones a severas condiciones para comprobar su resistencia contra el tizón tardío en Toluca y la infección natural de la enfermedad del valle en el retro cruzamiento se ubicó la resistencia en el cromosoma 8, la transgénica en si se obtuvo por la introducción de genes resistentes RB y de leucina de *S. bulbocastanum* en *Agrobacterium tumefaciens* desarmado, una parte del plásmido inductor de tumores (T-DNA) es transferido al genoma de las plantas que infecta, han permitido utilizar esta bacteria como sistema de transformación vegetal (Santos, 2017), línea LBA4404, con el vector binario de transformación pBINPlus-ARS, incluyen el uso de secuencias promotoras y terminadoras no patentadas (Belknap et al., 2008). Como se aprecia en la figura 21, de los 9 genotipos incluidos las papas, cuatro de ellos adquirieron la transgenia (H1, SP904; H2, SP920; H3, SP925; y H5, SP951) pero uno no la adquirió (H4, SP946) tres de ellos fueron híbridos somáticos (H7, J101K6; H8, J103K7; y H9, J101k6A22), y por último se tuvo a la variedad Katahdin sin transformar, como testigo (H6) (Lozoya-Saldaña et al., 2010).

1.3.3.2.2. ARN de interferencia

Los científicos pueden emplear el ARN de interferencia como una herramienta muy eficaz. Un método de silenciamiento génico postranscripcional conocido como ARN de interferencia utiliza diminutas moléculas de ARN para complementar un ARNm y provocar su destrucción, impidiendo que el ARNm se traduzca en proteínas (Ibarra, 2021).

El ARN de interferencia actualmente se ha utilizado en diferentes campos médicos y científicos, se ha encontrado que el ARN de interferencia es un potencial uso terapéutico contra la Covid-19 o también llamado SARS-CoV-2 que es una enfermedad respiratoria que se ha llevado a varias víctimas a escala global. Esta investigación puso en práctica el ARN de interferencia como alternativa terapéutica contra la Covid-19, ya que la ARN de interferencia (ARNi) se aplicó con éxito a los diferentes tratamientos antivirales, mostrando potencialidades en el contexto de enfermedades humanas causadas por Covid-19, el ARNi es una molécula ARN que hace parte de un mecanismo biológico procediendo al silenciamiento de los genes específicos a niveles post-transcripcional (Cuello Almarales et al., 2020).

Conociendo el mecanismo de los virus y demostrando que el SARS-CoV y el SARS-CoV-2 presentan similitudes significativas en su estructura genómica y su proceso patogénico, la aplicación del ARNi podría ser una opción terapéutica. La RNAi ha sido eficaz para la inhibición de la replicación viral en modelos celulares de hepatitis B, C, sida y SARS-CoV; se demostró que el uso de RNAi contra genes específicos y no estructurales, dando lugar a la inhibición de la replicación viral (Cuello et al., 2020).

Figura 22*Mecanismo de silenciamiento de genes específicos*

Nota: Fuente: Cuello Almarales et al., 2020.

Este mecanismo de silenciamiento (Ver Figura 22) de genes específicos cruza por una cierta secuencia de pasos, primero "iniciación", en donde la proteína celular Dicer de una ribonucleasa dependiente de ATP y miembro de la familia de ARNasa-III, se une a un dsRNA largo y lo escinde en un fragmento dúplex de 21 a 23 nucleótidos, llamado ARN de interferencia. El complejo de silenciamiento inducido por ARN (RISC), que se forma en la segunda etapa, o "efector", por la interacción del siARN con multinucleasas, escinde la cadena pasajera del siARN mientras deja la cadena guía intacta y activa. La hibridación del siARN con el ARNm diana provoca la rotura de este último y evita su traducción en proteína (Cuello Almarales et al., 2020).

Este método también se ha utilizado en un estudio multidisciplinar de un modelo experimental de cicatrización corneal grave, en el que se crea un modelo de quemadura corneal grave para comprobar cómo la aplicación de un efecto farmacológico basado en el mecanismo de interferencia del ARN modifica el curso de la cicatrización. El estudio demuestra que la molécula diana del fármaco aplicado es silenciada por el tratamiento, como evidencia la disminución de la presencia de células TRPV1-positivas y de su número (Martín, 2021).

1.3.3.3. Nuevas tendencias biotecnológicas en el desarrollo de biomateriales alternativos al cuero y al plástico

1.3.3.3.1. Introducción

Las industrias actuales consumen recursos naturales gran cantidad para cubrir la demanda poblacional, en especial, los plásticos sintetizados con polietileno, un material maleable y resistente de amplio uso y de rápido desecho; tiene dificultad para degradarse causando problemas de contaminación. Por otro lado, el cuero en la industria textil ha sido criticado por la crianza de animales en granja y su posterior sacrificio innecesario para aislar su piel que es empleada en la fabricación de prendas de vestir (Gonzales et al., 2022).

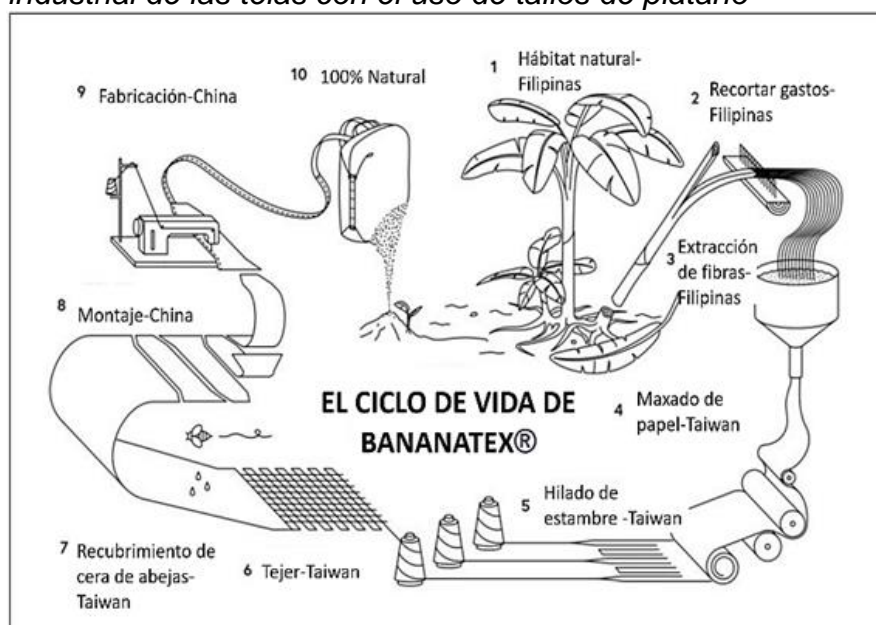
Algunas alternativas para la sostenibilidad en la producción de cueros y plásticos de gran demanda, está siendo cubierto por biomateriales, son materiales que interactúan con los seres vivos y reemplazan algunas de sus partes (Woodly Oy, 2020), es decir, la obtención de materiales a partir de recursos que provienen de fuentes amigables con el ambiente conservando las mismas propiedades en los cueros y el plástico con el plus de degradarse naturalmente en el ecosistema en menor tiempo.

1.3.3.3.2. Tendencias alternativas al cuero

Las tendencias en la industria de la moda según Gonzales et al., (2022) son el biocuero vegano hecho con micelios, pieles bioexóticas hechas de hojas de cactus y piña, pieles de semilla de uvas, tallos de plátano y agua de coco (Figura 23). A continuación, se detallan algunas alternativas:

Figura 23

Proceso industrial de las telas con el uso de tallos de plátano



Nota: Fuente: Gonzales et al., 2022.

Abacá, es una planta familia de las bananas originaria de filipinas, se cortan los tallos laterales de la planta para extraer la materia prima (fibras) usado en la producción de telas, la planta sigue creciendo por 30 a 40 años, manteniendo la planta y la cosecha. También se ha probado el teñido de prendas con bacterias para evitar el uso de químicos tóxicos, una técnica que se debe continuar investigando.

Otras alternativas son la producción de pieles a nivel in vitro, se ha logrado producir lana cultivada sin ovejas, mediante el uso de células madre pluripotentes y muestras extraídas con biopsias de la piel provenientes de visones y ovejas merinas vivas, luego las células son cultivadas para producir folículos pilosos de la piel, con ayuda de los cultivos en placas Petri se producirán pieles y con esto se evita la deforestación al construir corrales y la explotación de animales en granja (Davidson, 2022).

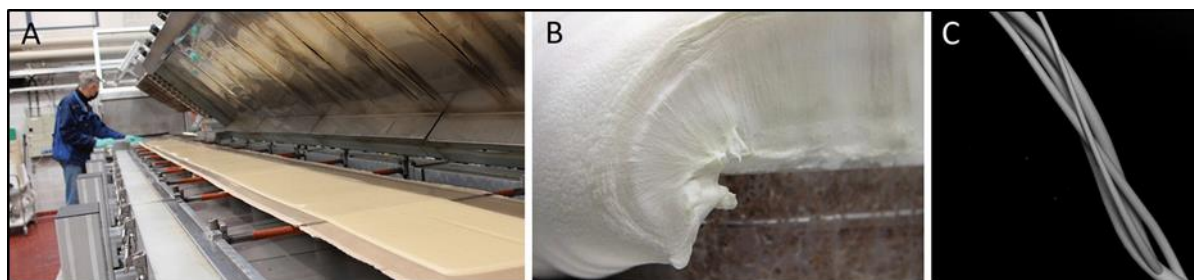
La empresa de biotecnología Bolt Threads® ha desarrollado un textil derivado del micelio con la estructura de la raíz de los hongos y el procesado en láminas similares al cuero, ¿cómo o por qué sucede? La parte vegetativa de un hongo es el micelio que son una masa de materiales compuestos ramificados, fibrosos y naturales con propiedades fisicoquímicas controladas. Luego, de tratamientos químicos y calientes se vuelve extremadamente duradero y resistente en el ambiente para obtener materiales idénticos al cuero (Raman et al., 2022).

1.3.3.3.3. Procesamiento de micelios para la industria textil.

Los materiales de micelio puro se pueden producir con varias tecnologías de fermentación, por elección está la fermentación líquida que es usada para recuperar metabolitos, enzimas o la biomasa micelial y con el conocimiento extenso se logran mantener los parámetros de cultivo que permite el crecimiento óptimo (Vandelook et al., 2021).

Figura 24

Modelos en la industria



Nota: a) Planta piloto b) Hifas de *Ganoderma ssp.* con crecimiento externo por fermentación en estado sólido c) Modelamiento del crecimiento de hifas **Fuente:** Vandelook et al. 2021.

En la figura 24 se muestra el proceso de crecimiento de biomasa micelial puro obtenido mediante fermentación en estado sólido con condiciones óptimas para obtener abundantes hifas aéreas, quienes se caracterizan por crecer lejos del

sustrato, hacia el exterior, los parámetros de temperatura, concentración de CO₂ y humedad son controlados de manera que no se diferencien en cuerpos fructíferos (Vandelook et al., 2021). Una de las principales fuerzas impulsoras para que el micelio vaya hacia el exterior es por el gradiente de CO₂ inducido por la respiración celular. Los componentes básicos de los micelios son glucanos, la quitina/quitosano y glicoproteínas, cuyas composiciones varían según las especies, éstas pueden ser: *Ganoderma* ssp., *Trametes versicolor*, *Fomes* ssp., *Pycnoporus* ssp. y *Perenniporia* ssp. Este es un ejemplo de producción en la empresa Ecovative©.

1.3.3.3.4. Bioplásticos

Una de las tendencias de biomateriales en los plásticos, es su fabricación a partir de almidón proveniente de los vegetales, esta molécula reemplazaría al polietileno, en el proceso se extrae el carbohidrato y luego es transformado en una molécula pequeña que es el ácido láctico por la acción de microorganismos, luego el producto obtenido es tratado para formar polímeros, quienes interactúan para formar poliácidos, es decir, plástico, de él se pueden fabricar macetas que se pueden enterrar, pañales desechables, hilos para sutura, etc. Otra alternativa biotecnológica es cultivar bacterias que producen en su interior gránulos de plásticos denominados polihidroxialcanoato y una vez obtenido el plástico se separa (ArgenBio, 2022).

La obtención de plásticos a partir de recursos biológicos usando materias primas renovables y las biorrefinerías mejoran la biomasa de primera y segunda generación (es decir, productos vegetales comestibles y biorresiduos no comestibles, respectivamente) en los mismos componentes básicos que los derivados del petróleo, una vez obtenidos los monómeros se pueden polimerizar de forma duradera como el furanoato de polietileno o en biodegradables como el ácido poliláctico. Otros como los polihidroxialcanoatos, se biosintetizan en microorganismos a partir de diversas materias primas (Rosenboom et al., 2022).

Las tecnologías de producción de microalgas son una fuente de biomateriales para el desarrollo de plásticos, esto debido a que tienen un rendimiento de crecimiento muy distintivo, en comparación con la biomasa lignocelulósica típica (Tetiana Shevchenko et al., 2022). Pedetti y Vaccaro (2017) publicaron un trabajo en donde propusieron la utilización de la microalga *Scenedesmus obliquus* modificada con un vector contenido la secuencia codificante de tres enzimas que le otorgan la capacidad a la bacteria *Ralstonia eutropha* de transformar lípidos en polihidroxialcanoatos, esto como alternativas a los almidones de maíz porque requieren de cultivos y deforestación, también alterno bacterias por su alto costo de mantenimiento.

1.4. Discusión

En este capítulo se abordaron 3 secciones enfocadas en brindar herramientas biotecnológicas para el monitoreo de la contaminación ambiental, seguidamente se consideraron herramientas para fortalecer la agricultura sustentable con el uso de microorganismos para fertilizantes, nuevos alimentos y tendencias en la agricultura 4.0; finalmente se consideraron estrategias de mitigación de impacto petrolero a través de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente de dióxido de carbono en diferentes industrias. En el contexto de carbono neutralidad, los aportes que potencialmente puede brindar la biotecnología ambiental son diversos, desde sistemas de producción más limpia, alimentos con mejores características nutricionales, tratamiento de aguas y residuos sólidos urbanos, al mismo tiempo que se puede generar fuentes de energía como el biogás. Finalmente, la combinación de las herramientas propuestas en la guía y las nuevas tendencias como la inteligencia artificial y machine learning deben ser estudiadas a profundidad, no solo sus potenciales beneficios sino también sus riesgos.

1.5. Conclusiones

Los factores bióticos y abióticos deben ser considerados técnicamente al diseñar un plan de biorremediación. En este sentido, los organismos deben responder a las variables abióticas como el clima (precipitaciones, insolación, temperatura, nubosidad, nieve), las rocas, los océanos y los ríos, así como los factores antropogénicos (todos los factores causados por las actividades humanas como la contaminación orgánica y/o inorgánica). En este sentido, la explotación de petróleo, a pesar de los réditos económicos, fragmenta los ecosistemas, por lo que ciertos sistemas agroforestales funcionan bien en suelos con cultivos permanentes, pastoreo y cobertura forestal, dando paso a proceso de fitorremediación.

Además, se determinó que una tendencia en biomateriales plásticos es la fabricación de almidón a partir de vegetales, que tiene el potencial de sustituir al polietileno. Los microorganismos convierten el carbohidrato en ácido láctico, que luego se trata para formar polímeros, que interactúan para formar poliácidos, o plástico, que puede utilizarse para fabricar macetas enterradas, pañales desechables, hilos de sutura, etc. Otro método biotecnológico consiste en cultivar bacterias productoras de polihidroxialcanoato y separar el plástico.

Las materias primas renovables y las biorrefinerías convierten la biomasa de primera y segunda generación (productos vegetales comestibles y biorresiduos

no comestibles, respectivamente) en monómeros que pueden polimerizarse en furanoato de polietileno duradero o ácido poliláctico biodegradable. Adicionalmente, las microalgas y cianobacterias crecen de forma diferente a la biomasa lignocelulósica, pueden utilizarse para fabricar bioplásticos. Otra alternativa para la sostenibilidad en la producción de cueros y plásticos de gran demanda están siendo cubiertas por hongos.

Referencias Bibliográficas

- ¿Qué es la biotecnología Ambiental? (2019, 28 octubre). Centro de Biotecnología. <https://www.centrobiotecnologia.cl/investigacion/que-es-la-biotecnologia-ambiental/>
- A Breath of Hope. (s.f.). Pruebas de biomarcadores en el cáncer de pulmón de células no pequeñas (NSCLC). Recuperado de: <https://www.ustedycancerdepulmon.com/es-cp/view/m701-s10-comprender-las-pruebas-de-biomarcadores-de-c%C3%A1ncer-de-pulm%C3%B3n-de-c%C3%A9lulas-no-peque%C3%B1as-presentaci%C3%B3n-de-diapositivas>
- Ab Rasid S. A.; Mahmood S. M.; Kechut N. I.; Akbari S. A Review on Parameters Affecting Nanoparticles Stabilized Foam Performance Based on Recent Analyses. J. Pet. Sci. Eng. 2022, 208, 109475. 10.1016/j.petrol.2021.109475
- Adenle, A. A., Sowe, S. K., Parayil, G., & Aginam, O. (2012). Analysis of open-source biotechnology in developing countries: An emerging framework for sustainable agriculture. *Technology in Society*, 34(3), 256-269.
- Aguilar, R. C. G., Guevara, G. J. L., & Taboada, M. R. E. H. (2021). Biocombustibles mediante residuos agroindustriales: por un mejor cuidado del medio ambiente del planeta. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 14443-14468.
- Al-Shargabi, M., Davoodi, S., Wood, D. A., Rukavishnikov, V. S., & Minaev, K. M. (2022). Carbon Dioxide Applications for Enhanced Oil Recovery Assisted by Nanoparticles: Recent Developments. *ACS omega*, 7(12), 9984–9994. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07123>
- Andrade, J., Lara-Basantes, C., Muñoz, D., & Chicaiza-Ortiz, C. (2022). EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LAS MATRICES

AMBIENTALES AGUA, SUELO Y ATMÓSFERA. Colección Científica Educación, Empresa y Sociedad. doi: 10.5281/zenodo.6858572

- ArgenBio. (2022). Biotecnología y plásticos biodegradables. ArgenBio. <https://www.argenbio.org/biotecnologia/aplicaciones-de-la-biotecnologia/172-biotecnologia-y-plasticos-biodegradables>
- Assad, M., Banihani, E. (2017). Recent Technologies in Mitigating Oil Spill Accidents. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, 1(3), 2–7. <https://doi.org/10.23880/ppej-16000120>
- Barcelos, M. C. S., Lupki, F. B., Campolina, G. A., Nelson, D. L., & Molina, G. (2018). The Colors of Biotechnology: general overview and developments of White, Green and Blue areas. *FEMS Microbiology Letters*. doi:10.1093/femsle/fny239.
- Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 261-282.
- Bravo, N. S. (2019). *Bacillus thuringiensis* como controlador biológico en la agricultura. *Agricolae & Habitat*.
- Barreiro, D. (2022). Objetivo: Parecerse a la carne. *Eurocarne: La revista internacional del sector cárnico*, (305), 32-44.
- Barrett, H., & Rosal, D. C. (2020). Perceptions of the Fourth Agricultural Revolution: What's In, What's Out, and What Consequences are Anticipated? *Journal of the European Society for rural sociology*, 62(2), 162-189. <https://doi.org/10.1111/soru.12324>
- Belknap, W. R., Rockhold, D. R., & McCue, K. F. (2008). pBINPLUS/ARS: An improved plant transformation vector based on pBINPLUS. *BioTechniques*, 44(6), 753-756. <https://doi.org/10.2144/000112731>
- Bonny, S. P. F., Gardner, G. E., Pethick, D. W., & Jean-Francois, H. (2015). What is artificial meat and what does it mean for the future of the meat industry. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 255–263. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60888-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60888-1).
- Bravo, N. S., & Agroambiental, E. E. B. *Bacillus thuringiensis* como controlador biológico en la agricultura.
- Cambarieri, L., Pucci, G. N., & Acuña, A. J. (2021). Optimización de un proceso de bioestimulación en un suelo de Río Gallegos, Argentina, para su utilización en biorremediación de hidrocarburos: . *Ecosistemas*, 30(1), 2084. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2084>

- Canal Diabetes. (2017). Nueva metodología permite rápidamente los flujos del metabolismo. Recuperado de: <https://canaldiabetes.com/flujos-del-metabolismo/>
- Cantaro-Segura, H., Huaranga-Joaquín, A., & Zúñiga-Dávil, D. (2019). Efectividad simbiótica de dos cepas de *Rhizobium* sp. en cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 73-81.
- Castebianco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 21-35.
- Castrejón, B. (2021). Bagazo de agave: de desecho agroindustrial a materia prima en las biorrefinerías. Recuperado de: <https://ciencia.unam.mx/leer/1112/bagazo-de-agave-de-desecho-agroindustrial-a-materia-prima-en-las-biorrefinerias->
- Castro-Ortíz, L. P., Luna Pabello, V. M., & Villalobos Pietrini, R. (2007). Estado del arte y perspectivas del uso de biosensores ambientales en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(1), 35-45.
- Checa-Artos, M., Sosa del Castillo, D., Vanegast M.E., Ruiz-Barzola O. y Barcos-Arias, M. (2021). Remoción de cinco productos farmacéuticos catalogados como contaminantes emergentes en medio acuoso utilizando la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). *Latin American Journal of Biotechnology and Life Sciences Bionatura*. 6 (1), 1478-1485.
- Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Yap, Y. J., Ong, H. C., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2018). Analysis of economic and environmental aspects of microalgae biorefinery for biofuels production: a review. *Biotechnology journal*, 13(6), 1700618.
- Choi JW Nicot JP Hosseini SA et al. , contabilidad de reciclaje de CO₂ y programación de operaciones de EOR para ayudar en la evaluación de la capacidad de almacenamiento en un reservorio agotado en la costa del golfo de EE. UU. En t. J. Control de gases de efecto invernadero. 2013; 18 :474–484. doi: 10.1016/j.ijggc.2013.01.033.
- Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2020). The myth of cultured meat: A review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00007>.
- Chrobok, D. (2022). La descontaminación de suelos mediante fitorremediación. Recuperado de: <https://www.aepjp.es/la-descontaminacion-de-suelos-mediante-fitorremediacion/>
- Cisneros, J. J., & Luis, G. O. (2021). La biorremediación como una alternativa de limpieza ambiental.

- Corneliu, C., Lucia, P., Samoila, P., Harabagiu, V. (2017). Surface hydrophobization of polyester fibers with poly (methylhydro-dimethyl) siloxane copolymers: Experimental design for testing of modified nonwoven materials as oil spill sorbents. *Polymer Testing* 59: 377-389.
- Covarrubias, S. A., & Cabriaes, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33, 7-21.
- Cuello Almarales, D. A., Almaguer Mederos, L. E., & Almaguer Gotay, D. (2020). Potencial uso terapéutico del ARN de interferencia contra la COVID-19 TT - Potential therapeutic use of RNA interference against COVID-19. *Rev. habanera cienc. méd*, 19(4), e3400-e3400. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1729-519X2020000500004&script=sci_arttext&tlng=en
- da Silveira, F., Lermen, F. H., & Amaral, F. G. (2021). An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106405
- Davidson, L. (2022, January 26). Mycelium Materials Company Ecovative Launches Forager to Develop Mushroom Leather Products and Soft Goods. *Business Wire*. <https://www.businesswire.com/news/home/20220126005322/en/Myceliu-m-Materials-Company-Ecovative-Launches-Forager-to-Develop-Mushroom-Leather-Products-and-Soft-Goods>
- Delgado, A., Perez, J. C., Cardona Gallo, S., & Loaiza-Usuga, J. C. (2019). Bioremediation (Biostimulation And Bioaugmentation) Of Oil Spills Contaminated Soils Under Tropical Humid Forest. *Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences*, 14(1), 165–170. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/068>
- Domínguez R. et al., (2019). Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad: 70 años de pensamiento de la CEPAL, Libros de la CEPAL, N° 158 (LC/PUB.2019/18-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/1/S1900378_es.pdf
- Dos Santos Lopes, J. C., Soares de Paula, R., Gonçalves dos Santos, K. J., Pinheiro Pales, A., da Silva Castro, C., & Ferreira Daniel Santos, J. (2019). Animais Transgênicos: Conceito, Metodologias y Aplicações. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63653009005>

- EPA [Environmental Protection Agency], 2000. Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio (EPA/600/R-99/107). <https://clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>
- Fakher S.; Imqam A. Application of Carbon Dioxide Injection in Shale Oil Reservoirs for Increasing Oil Recovery and Carbon Dioxide Storage. *Fuel* 2020, 265, 116944. 10.1016/j.fuel.2019.116944
- FAO. (2020). Hambre e inseguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ferreira, C. S. R., Alves, E. S., Costa, J. C. M., Ferreira, C. M. R., Friedrichsen, J. S. A., Frigo, G., ... & Santos, O. O. (2022). Produção de carne artificial como uma alternativa sustentável: Revisão. *Research, Society and Development*, 11(7), e47011730346- e47011730346.
- Flores, C. S. (2020). America latina ante el flagelo del hambre y la integración regional. *Boletín integración regional. Una mirada crítica*. N° 9
- Garvin, W., Harms, U., Shearer, C., & Simonneaux, L. (s. f.). Animales transgénicos Animais transgênicos Iniciativa Europeia para o Ensino da Biotecnologia UNIDADE 11 Colaboradores desta Unidade.
- Gaudreau, M. (2018). State food security and people's food sovereignty: competing visions of agriculture in China. *Canadian Journal of Development Studies. Revue Canadienne D'études Du Développement*, 1, 1-17. doi:10.1080/02255189.2017.1410470
- Ghahari, S., Ghahari, S., Ghahari, S., Nematzadeh, G. A., & Sarma, H. (2021). Environmental Biotechnology: Toward a Sustainable Future. In *Biotechnology for Sustainable Environment* (pp. 1-31). Springer, Singapore.
- Gomes Filho, L. S., Silva, J. M. M., Santos, B. H. B., Piantino, V., Gonçalves, V. A., Manfroij, M. L., Albuquerque, V. C., Pereira, D., Albertino, L. F., & Mesquita, I. B. (2020). Vitriificação de oócitos: Relato De Caso. *Brazilian Journal of Health Review*, 3(3), 6653-6657. <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n3-208>
- Gonzales, J., Butler, R., & Scherer, G. (2022, April 8). Sustainable fashion: Biomaterial revolution replacing fur and skins. *Mongabay*. <https://news.mongabay.com/2022/04/sustainable-fashion-biomaterial-revolution-replacing-fur-and-skins/>
- Grasso M. A Critical Assessment of the Oil and Gas Industry's Contribution to Climate Change. *E.R. S. Science* 2019, 50, 106–115. 10.1016/j.erss.2018.11.017.

- Gupta, V., Sengupta, M., Prakash, J., & Tripathy, B.C. (2017). An Introduction to Biotechnology. Basic and Applied Aspects of Biotechnology, 2, 1-21. 10.1007/978-981-10-0875-7_1
- Hao, H., Hou, J., Zhao, F., Huang, H. y Liu, H. (2021). Proceso de huff-n-puff de CO₂ asistido por espuma de N₂ para la recuperación mejorada de petróleo en un yacimiento heterogéneo de agua de borde: experimentos y pruebas piloto. Avances RSC, 11 (2), 1134–1146. <https://doi.org/10.1039/d0ra09448j>
- Henning, N., Kunkel, U., Wick, A., & Ternes, T. A. (2018). Biotransformation of gabapentin in surface water matrices under different redox conditions and the occurrence of one major TP in the aquatic environment. Water research, 137, 290-300.
- Hernández, I. C., & Gouttefanjat, F. (2022). Sustentabilidad, tecnología ambiental y regeneración ecosistémica: retos y perspectivas para la vida. Universidad y Sociedad, 14(2), 142-157.
- Hernández-Melchor, D. J.-C. (2019). *Trichoderma*: importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 98-112.
- Huamán-Castilla, N. L., Allcca-Alca, E. E., Allcca-Alca, G. J., & Quispe-Pérez, M. L. (2021). Biopolímeros producidos por *Azotobacter*: síntesis y producción, propiedades físico-mecánicas, y potenciales aplicaciones industriales. Scientia Agropecuaria, 12(3), 369-377.
- Hurtado, I. L. S., Rivera, G. L. C., Macías, M. C. G., & Posligua, J. D. M. (2019). La ciencia de la biotecnología y sus aplicaciones. RECIAMUC, 3(3), 902-920.
- Ibarra, L. (2021). ARN de Interferencia. Science, 1(1), 40. <https://sylentis.com/index.php/es/tecnologia/2-uncategorised/15-arn-de-interferencia>
- Iraji B. Shadizadeh SR Riazi M. Investigación experimental de soplos y soplos de CO₂ en un sistema de fractura de matriz. Gasolina. 2015; 158 :105–112. doi: 10.1016/j.combustible.2015.04.069.
- Jaramillo-Salazar, M. T., Marín-Giraldo, Y., & Ocampo-Serna, D. M. (2018). Efectos en el nivel fotosintético en tres especies de plantas acuáticas sometidas a un tratamiento con agua residual de origen minero. Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural, 22(1), 43-57.
- Jin L. Hawthorne S. Sorensen J. et al., Advancing CO₂ enhanced oil recovery and storage in unconventional oil play—experimental studies on Bakken

- shales. Appl. Energy. 2017;208:171–183. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.054.
- Jofre, J. (2017). “Oportunitats relacionades amb el cicle integral de l’aigua per a les empreses de l’Àrea Metropolitana de Barcelona”. Pla estratègic Metropolità de Barcelona. Barcelona. Col·lecció estratègica, núm. 5}
- Johnson Matthey. (2017, 5 abril). “Algae and Environmental Sustainability”: Ingenta Connect. Ingenta. Recuperado 24 de mayo de 2022, de <https://www.ingentaconnect.com/content/matthey/jmtr/2017/00000061/0000002/art00008;jsessionid=4jn1hr6jm62t3.x-ic-live-02>
- Justin, R., Sokovic, M. (2011). Industrialization of Easy Boom. Archives of Materials Science and Engineering 47(2): 110-116.
- Kahn, T. W., Duck, N. B., McCarville, M. T., Schouten, L. C., Schweri, K., Zaitseva, J., & Daum, J. (2021). A Bacillus thuringiensis Cry protein controls soybean cyst nematode in transgenic soybean plants. Nature communications, 12(1), 1-12
- Kim, S. H., Woo, H., An, S., Chung, J., Lee, S., & Lee, S. (2022). What determines the efficacy of landfarming for petroleum-contaminated soils: Significance of contaminant characteristics. Chemosphere, 290, 133392.
- Kizil, S., Hayal, B. (2017). Oil loving hydrophobic gels made from glycerol propoxylate: Efficient and reusable sorbents for oil spill clean-up. J Environ Manage 196: 330-339.
- Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? Global Food Security, 24, 100347. doi: 10.1016/j.gfs.2019.100347
- La Biotecnología. (2021, 25 noviembre). ▷ Biotecnología Ambiental: Definición, Importancia, ventajas y desventajas. Recuperado 24 de mayo de 2022, de <https://labiotecnologia.com/biotecnologia-ambiental/>
- Landra, Y. A. G., Neves, F. A., Neto, R. C., Alonso, A. A. B., & Viltre, L. L. (2020). Revisão e comparação dos recentes requisitos de integração de fontes renováveis de energia/Review and comparison of recent requirements for the integration of renewable energy sources/Revisión y comparación de los actuales requisitos de integración de fuentes renovables de energía. Ingeniería Energética, 41(3).
- Lemaire P. C.; Alenzi A.; Lee J. J.; Beckman E. J.; Enick R. M. Thickening CO₂ with Direct Thickeners, CO₂-in-Oil Emulsions, or Nanoparticle Dispersions: Literature Review and Experimental Validation. Energy Fuels 2021, 35 (10), 8510–8540. 10.1021/acs.energyfuels.1c00314.

- Li, L., Wang, C., Li, D., Fu, J., Su, Y., & Lv, Y. (2019). Experimental investigation of shale oil recovery from Qianjiang core samples by the CO₂ huff-n-puff EOR method. *RSC advances*, 9(49), 28857–28869. <https://doi.org/10.1039/c9ra05347f>
- Liu, H.; Wang, F.; Zhang, J.; Meng, S.; Duan, Y. (2014). Fracturación con dióxido de carbono: estado de aplicación y tendencia de desarrollo. *Mascota. Explorar desarrollo*. 41, 513 – 519, DOI: 10.1016/S1876-3804(14)60060-4
- Lozoya-Saldaña, H., Belmar-Díaz, C. R., Bradeen, J. M., & Helgeson, J. P. (2010). Caracterización de poblaciones de *Phytophthora infestans* (mont, de bary) obtenidas de *Solanum* transgénicas y de híbridos somáticos resistentes. *Interciencia*, 35(10), 784-788. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33915592013>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2016). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3315–3335. doi:10.1007/s11356-016-8104-0
- Marchiol, L. (2019). Nanofertilisers. An outlook of crop nutrition in the fourth agricultural revolution. *Italian Journal of Agronomy*, 4(3), 183-190. doi.org/10.4081/ija.2019.1367
- Martín, E. L. (2021). Estudio multidisciplinar de un modelo experimental de cicatrización corneal grave: efecto de un fármaco basado en el mecanismo del *arn* de interferencia - Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=293418>
- Massarweh O.; Abushaikha A. S. A Review of Recent Developments in CO₂ Mobility Control in Enhanced Oil Recovery. *Petroleum* 2021, 10.1016/j.petlm.2021.05.002.
- Mera, B. E. D., & García, M. J. L. (2023). Fitorremediación con *Eichhornia crassipes* en aguas residuales del cantón Jipijapa, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 6, e221-e221.
- Migliorini, P., Bàrberi, P., Bellon, S., Gaifami, T., Gkisakis, V. D., Peeters, A., & Wezel, A. (2020). Controversial topics in agroecology: A European perspective. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura*, 47(3), 159-173.
- Morera, F. A. (2021). USO DE LOS BIOFESTILIZANTES EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE. *Agricolae & Habitat*.
- Muller, B. (2020). Genetically modified food sovereignty? Willy street coop. <https://www.willystreet.coop/pages/genetically-modified-food-sovereignty>

- Munive Cerrón, R., Gamarra Sánchez, G., Munive Yachachi, Y., Puertas Ramos, F., Valdiviezo Gonzales, L., & Cabello Torres, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177-186.
- Muttin, F. (2016). Oil spill boom modelling by the finite-element method. *Water pollution* 111: 383-392
- Narciso-Ortiz, Vargas-García, Vázquez-Larios, Quiñones-Muñoz, Hernández-Martínez, Lizardi-Jiménez, (2020). Coral reefs and watersheds of the Gulf of Mexico in Veracruz: Hydrocarbon pollution data and bioremediation proposal, *Regional Studies in Marine Science*, (35); 101155, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101155>.
- Nguyen, V. T., Kwon, Y. S., & Gu, M. B. (2017). Aptamer-based environmental biosensors for small molecule contaminants. *Current opinion in biotechnology*, 45, 15-23.
- Orellana R, Cumsille A, Piña-Gangas P, Rojas C, Arancibia A, Donghi S, Stuardo C, Cabrera P, Arancibia G, Cárdenas F, Salazar F, González M, Santis P, Abarca-Hurtado J, Mejías M, Seeger M. Economic Evaluation of Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Urban Soils in Chile. *Sustainability*. (2022); 14(19):11854. <https://doi.org/10.3390/su14191185>
- Orellana R, Macaya C, Bravo G, Dorochesi F, Cumsille A, Valencia R, Rojas C y Seeger M (2018) . Living at the Frontiers of Life: Extremophiles in Chile and Their Potential for Bioremediation. *Frontiers in Microbiology*; (9) Recuperado de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02309>
- Ortega, Y. D. L. M. D., Gálvez, Y. F., Ramírez, E. R., Tomes, A. V., & Gort, D. G. (2019). Efecto de cinco bioestimulantes en el fortalecimiento de posturas de caña de azúcar y su resistencia al transplante. *Agrisost*, 25, 1-8.
- Pachon Romero, J. P. (2018). Principios de la soberanía alimentaria puestos en práctica por los actores de mercados campesinos, para la construcción de seguridad alimentaria y nutricional: Caso Sibaté (Cundinamarca). Facultad de Medicina.
- Parraguez Vergara, E., Contreras, B., Clavijo, N., Villegas, V., Paucar, N., & Ther, F. (2018). Does indigenous and campesino traditional agriculture have anything to contribute to food sovereignty in Latin America? Evidence from Chile, Peru, Ecuador, Colombia, Guatemala and Mexico. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 16(4-5), 326-341. <https://doi.org/10.1080/14735903.2018.1489361>

- Patel, P. J., Trivedi, G. R., Shah, R. K., & Saraf, M. (2018). Selenorhizobacteria: As biofortification tool in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 198-203.
- Pedetti, P., & Vaccaro, V. (2017). Utilización de microalgas para la potencial producción de polihidroxialcanoatos. Repositorio Académico Digital. <https://dspace.ort.edu.uy/handle/20.500.11968/3570>
- Peters KE, Moldowan JM (1993): The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossil in Petroleum and Ancient Sediments. Vol 1, Prentice Hall Press, New Jersey, pp 361
- Post, M. J. (2014). Cultured beef: Medical technology to produce food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(6), 1039–1041. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6474>.
- Qaim, M. (2017). Globalisation of agrifood systems and sustainable nutrition. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76(1), 12-21. doi:10.1017/S0029665116000598
- Quillca Aldazabal, Y. X., & Rojas Ariza, Y. (2022). Bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos: fitorremediación y vermiremediación. Revisión sistemática 2022.
- Raman, J., Da -, K., Kim, H., & Shin, H. (2022, March 19). Mycofabrication of Mycelium-Based Leather from Brown-Rot Fungi. MDPI. <https://www.mdpi.com/2309-608X/8/3/317/htm>
- Ramos Armella, L. I. (2023). Mujeres que exponen vulnerabilidades generadas por la actividad hidrocarburífera en la Norpatagonia.
- Recabarren-Villalón, T., A. C. Ronda y A. H. Arias. (2019). Uso de biomarcadores en la evaluación ambiental de ecosistemas marinos en América. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático* 1(2): 1-18. doi 10.26359/52462.0719
- Rosa, A.P., Triguís, J.A. Bioremediation process on Brazil shoreline. *Env Sci Poll Res Int* 14, 470–476 (2007). <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1065/espr2007.02.377>
- Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2. doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022, January 20). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*. <https://www.nature.com/articles/s41578-021-00407-8>

- Rothschuh Osorio, U. (2022). Biorremediación: qué es, tipos y ejemplos. Recuperado de: <https://www.bioenciclopedia.com/biorremediacion-que-es-tipos-y-ejemplos-769.html>
- Rubio-Sanz, L., Garzón-Molina, M., Arnés-García, M., & Jaizme-Vega, M. C. (2020). Optimización del desarrollo, nutrición y producción de semillas de *Moringa oleifera* mediante el uso de micorrizas bajo manejo agroecológico. *Agroecología*, 14(1), 81-90.
- Sanabria, J. (2014). Environmental biotechnology research: challenges and opportunities in Latin America. *Journal of agricultural and environmental ethics*, 27(4), 681-694.
- Santafe Troncoso, V., & Loring, P. A. (2021). Indigenous food sovereignty and tourism: the Chakra Route in the Amazon region of Ecuador. *Journal of Sustainable Tourism*, 29(2), 392-411. doi.org/10.1080/09669582.2020.1770769
- Santos R., J. (2017). Transformación de *Agrobacterium tumefaciens* CEPA LBA4404 con el vector binario pNOV022, selección in vitro y caracterización molecular. *Impact factor*, 7(1), 68-69. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/26046>
- Scragg, A. H. (2005). *Environmental biotechnology*. New York: OXFORD university press.
- Sharma, R. K., & Agrawal, M. (2005). Biological effects of heavy metals: an overview. *Journal of environmental Biology*, 26(2), 301-313.
- Shutterstock. (s.f.). Biocombustible. Recuperado de: <https://www.shutterstock.com/es/search/biocombustible>
- Simon R. Graue D. J. Generalized correlations for predicting solubility, swelling and viscosity behavior of CO₂-crude oil systems. *J. Pet. Technol.* 1965;17(1):102–106. doi: 10.2118/917-PA
- Singh, R. (2019). Microbial biotechnology: a promising implement for sustainable agriculture. In *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 107-114). Elsevier.
- Singh, R. L. (2017). Introduction to environmental biotechnology. In *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future* (pp. 1-12). Springer, Singapore.
- Smitha, M. S., Singh, S., & Singh, R. (2017). Microbial biotransformation: a process for chemical alterations. *J Bacteriol Mycol Open Access*, 4(2), 85.

- Soares, G., Huff Theodoro, S., Carvalho, A. M., Burbano, D., & Ramos, C. (2023). Remineralizadores de suelos y sistemas agroforestales: una opción para la captura de CO₂.
- Tao, J., Meng, S., Jin, X., Xu, J., Yang, Q., Wang, X., Liu, H., & Peng, B. (2021). Stimulation and Sequestration Mechanism of CO₂ Waterless Fracturing for Continental Tight Oil Reservoirs. *ACS omega*, 6(32), 20758–20767. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01059>
- Tetiana Shevchenko, Ranjbari, M., Esfandabadi, Z. S., danko, y., & Danko, K. B. (2022, March 25). Promising Developments in Bio-Based Products as Alternatives to Conventional Plastics to Enable Circular Economy in Ukraine. MDPI. <https://www.mdpi.com/2313-4321/7/2/20/html>
- Tong X. Zhang G. Wang Z. Wen Z. Tian Z. Wang H. Ma F. Wu Y. Distribution and potential of global oil and gas resources. *Petrol. Explor. Dev.* 2018;45(04):219–229. doi: 10.1016/S1876-3804(18)30081-8.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2021). Biosensor de nanopartículas de oro para detectar hipertensión arterial. Recuperado de: <https://ciencia.unam.mx/leer/1118/biosensor-de-nanoparticulas-de-oro-para-detectar-hipertension-arterial>
- Van den BergGordillo, L., Goris, M., Mancini Teixeira, H., Cardoso, I. M., & Botelho, I. M. (2017). Agroecology for Food Sovereignty. *Farming Matters*. <https://www.ileia.org/2017/04/18/agroecology-food-sovereignty/>
- Vandelook, S., Elsacker, E., Wylick, A. V., Laet, L. D., & Peters, E. (2021, December 20). Current state and future prospects of pure mycelium materials - Fungal Biology and Biotechnology. *Fungal Biology and Biotechnology*. <https://fungalbiolbiotech.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40694-021-00128-1>
- Vélez-Rolón, A. M., Pulido-López, A., Neira-Bermúdez, D., & Méndez-Pinzón, M. (2020). Hambre y seguridad alimentaria, desafío de la agenda 2030. Una mirada desde la integración latinoamericana. *Catálogo editorial*, 106-119.
- Veloz, N., Chicaiza-Ortiz, C., Arellano, D., Buenaño, J., Camacho, C., Duque, A., Echeverría, A., Mejía, B., Romero, J., & Yambay, C. (2015). Proceso de remediación de las muestras de suelo contaminados con hidrocarburos del CESTTA mediante las técnicas de bioestimulación, bioaumentación y fitorremediación. Doi: 10.13140/RG.2.1.2882.6083
- Vergara-Romero, A., Menor Campos, A., Arencibia Montero, O., & Jimber del Río, J. A. (2022). Soberanía alimentaria en Ecuador: descripción y análisis bibliométrico. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 498-510.

- Verma, G., & Ravichandran, S. (2020). Evolution of biotechnology as a million dollar market: The Management and commerce of a biotech start-up. In *Biotechnology Business-Concept to Delivery* (pp. 161-178). Springer, Cham.
- Viera-Arroyo, W. F.-T.-S.-S.-R.-P. (2020). Control Biológico: Una herramienta para una agricultura sustentable, un punto de vista de sus beneficios en Ecuador. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 128-149.
- Wallace, M. A. G., Kormos, T. M., & Pleil, J. D. (2016). Blood-borne biomarkers and bioindicators for linking exposure to health effects in environmental health science. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 19(8), 380-409.
- Woodly Oy. (2020). What are biomaterials? Woodly. https://woodly.com/circular_economy/what-are-biomaterials/
- Yahya, N. (2018). Agricultural 4.0: Its Implementation Toward Future Sustainability. *Green Energy and Technology*, 125–145. doi:10.1007/978-981-10-7578-0_5
- Yang X.; Cai J.; Jiang G.; Xie J.; Shi Y.; Chen S.; Yue Y.; Yu L.; He Y.; Xie K. Nanoparticle Plugging Prediction of Shale Pores: A Numerical and Experimental Study. *Energy* 2020, 208, 118337. 10.1016/j.energy.2020.118337.
- Yu W.; Kanj MY Revisión de la estabilidad de la espuma en medios porosos: el efecto del engrosamiento. *J. Mascota. ciencia Ing.* 2022, 208, 109698. 10.1016/j.petro.2021.109698.
- Zhang Y.; Liu Q.; Ye H.; Yang L. L.; Luo D.; Peng B. Nanoparticles as Foam Stabilizer: Mechanism, Control Parameters and Application in Foam Flooding for Enhanced Oil Recovery. *J. Pet. Sci. Eng.* 2021, 202, 108561. 10.1016/j.petro.2021.108561
- Zhang Y.; Zhu Z.; Tang J. Research on Polyether-Based Hydrocarbon Thickener for CO₂. *Fluid Phase Equilib.* 2021, 532, 112932. 10.1016/j.fluid.2020.112932
- Zhang, M., Li, L., & Bai, J. (2020). Consumer acceptance of cultured meat in urban areas of three cities in China. *Food Control*, 107390. Doi: 10.1016/j.foodcont.2020.10739
- Zhang, P., Chicaiza, C. O., & Zhang, J. (2022). Additive strategies for enhanced anaerobic digestion for bioenergy and biochemicals. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 131- 158). Elsevier.
- Zou, C.; Yang, Z.; Cui, J.; Zhu, R.; Hou, L.; Tao, S.; Yuan, X.; Wu, S.; Lin, S.; Wang, L.; Bai, B.; Yao, J. (2013). Mecanismo de formación, características

geológicas y estrategia de desarrollo del petróleo de esquisto no marino en China. *Mascota. Explorar Desarrollo*. 40, 15 – 27, DOI: 10.1016/S1876-3804(13)60002-6

Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., & Stawarczyk, K. (2019). Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review. *Water, air, & soil pollution*, 230(7), 1-9.