**Biodegradación y Biorremediación: Estrategias Microbianas para la Recuperación Ambiental**

Fredy Ronald Cutipa Apaza,1, Jhon Erick Hancco Mamani,1, Shomara Azumi Mendosa Ccalla1.

1Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingenieria y Arquitectura, EP Ingenieria Ambiental

juliaca, Peru.

Resumen

La contaminación ambiental, provocada por actividades humanas como la industria, la agricultura intensiva y la mala gestión de residuos, se ha convertido en un problema serio para los ecosistemas. Frente a esta situación, la biodegradación y la biorremediación se presentan como alternativas sostenibles y efectivas para reducir el impacto negativo. La **biodegradación** es un proceso en el que microorganismos, como bacterias y hongos, descomponen compuestos orgánicos complejos en sustancias más simples y menos dañinas. Este proceso natural es la base de la **biorremediación**, una técnica que utiliza organismos vivos para limpiar suelos, agua o incluso el aire contaminado.

Dentro de la biorremediación existen diferentes enfoques. Por ejemplo, la **bioestimulación** busca mejorar las condiciones del entorno (como añadir nutrientes) para que los microbios que ya están presentes trabajen mejor. Otra técnica es la **bioaumentación**, donde se introducen microorganismos específicos que tienen una alta capacidad para degradar ciertos contaminantes. También está la **fitorremediación asistida**, que combina plantas y microorganismos para recuperar zonas contaminadas. Estas estrategias no solo son más baratas que otros métodos, sino que también son menos invasivas y más amigables con el medio ambiente.

Eso sí, su éxito depende de varios factores, como el tipo de contaminante, el lugar afectado y las especies microbianas disponibles. A pesar de los desafíos, la ciencia sigue avanzando en este campo, desarrollando nuevas cepas microbianas y mejorando la comprensión de estos procesos, lo que refuerza el potencial de la biorremediación como una solución clave para la recuperación ambiental.

**Abstract**

Environmental pollution, caused by human activities such as industrialization, intensive agriculture, and poor waste management, poses a serious threat to ecosystems. In response to this issue, biodegradation and bioremediation emerge as sustainable and effective strategies for mitigating environmental damage. Biodegradation is a biological process in which microorganisms break down complex organic compounds into simpler, less harmful substances, forming the basis of bioremediation. This technique employs living organisms—mainly bacteria, fungi, and archaea—to remove or neutralize pollutants in soil, water, and air. Key approaches include biostimulation, bioaugmentation, and assisted phytoremediation, each offering specific advantages in terms of cost, environmental impact, and applicability. However, the success of these strategies depends on several factors, such as the type of contaminant, site conditions, and microbial diversity. Despite certain challenges, ongoing advances in microbiological and biotechnological research continue to enhance the potential of bioremediation as a key solution for restoring degraded environments.

*Palabras clave:* Meteorizacion, suelo, organismos.

1. Introducción

En las últimas décadas, la actividad humana ha intensificado la degradación ambiental a través de procesos industriales, prácticas agrícolas intensivas y una inadecuada gestión de residuos sólidos y líquidos. Esta situación ha contribuido a la contaminación generalizada de suelos, cuerpos de agua y atmósfera, afectando gravemente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (García, 2019). La creciente preocupación por la contaminación ambiental ha llevado a buscar soluciones más sostenibles que los métodos convencionales físico-químicos. La biorremediación se basa en el uso de organismos vivos, principalmente microorganismos, para eliminar o transformar contaminantes del entorno. Este artículo de revisión examina los fundamentos de la biodegradación y las estrategias microbianas de biorremediación, enfocándose en su aplicación a diferentes matrices ambientales y tipos de contaminantes (atlas & bartha, 1981). Sobre esta base se sustenta la **biorremediación**, una estrategia biotecnológica que utiliza organismos vivos para eliminar o neutralizar contaminantes. Entre sus modalidades más estudiadas se encuentran la **bioestimulación**, que consiste en optimizar las condiciones ambientales para favorecer el crecimiento microbiano; la **bioaumentación**, que implica la introducción de cepas microbianas especializadas; y la **fitorremediación asistida**, que aprovecha la interacción entre plantas y microbios para limpiar suelos y aguas contaminadas (Ghosal).

1. Desarrollo o Revisión
   1. Definición de Biodegradación y Biorremediación

La biodegradación es un proceso natural mediante el cual los microorganismos transforman sustancias complejas en compuestos más simples. Es el fundamento de procesos ecológicos esenciales, como el ciclo del carbono. La biorremediación, por otro lado, es la aplicación intencionada de este fenómeno, con fines de recuperación ambiental.

* 1. **Estrategias de Biorremediación**

La biorremediación se implementa de manera in situ o ex situ. Las técnicas in situ, como la bioestimulación (estimulación de microorganismos autóctonos con nutrientes) y la bioaumentación (introducción de microorganismos especializados), se aplican directamente en el sitio contaminado. Las ex situ implican la extracción del material para su tratamiento en condiciones controladas, como biorreactores o pilas de compostaje.

**2.3 Microorganismos Implicados**

Diversos microorganismos han demostrado alta eficiencia en la degradación de contaminantes. Bacterias del género Pseudomonas, Bacillus, y Rhodococcus son frecuentes en ambientes contaminados con hidrocarburos, gracias a su capacidad para producir biosurfactantes y enzimas especializadas (De la Rosa Cruz et al., 2013). Hongos como Phanerochaete chrysosporium destacan en la degradación de compuestos ligninolíticos y pesticidas persistentes, debido a la producción de ligninasas. Estos organismos han sido utilizados incluso en biopilas y sistemas de filtración biológica.

**2.4 Fundamentos de la Biodegradación**

La biodegradación implica la descomposición de compuestos orgánicos por microorganismos como bacterias, hongos y levaduras. Este proceso puede ser aeróbico o anaeróbico, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Los productos finales suelen ser dióxido de carbono, agua, biomasa y, en condiciones anaerobias, metano. La eficacia del proceso depende de factores como el pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la estructura molecular del contaminante (Atlas & Bartha, 1998). Además, el tipo de enzimas expresadas por las especies microbianas condiciona la velocidad del proceso.

1. Microorganismos nativos con potencial de biorremediación

La diversidad microbiana presente en los ecosistemas peruanos, especialmente en zonas impactadas por actividades mineras y agrícolas, ha demostrado una notable capacidad para degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estos microorganismos nativos se han adaptado a condiciones extremas, lo que los convierte en candidatos ideales para estrategias de biorremediación local.

### 3.1 Degradación de hidrocarburos en suelos agrícolas (Huamachuco, La Libertad)

En un estudio realizado por la Universidad Nacional de Trujillo, se identificaron bacterias capaces de degradar hidrocarburos del petróleo, específicamente diésel al 1 %, en suelos agrícolas contaminados. Entre las cepas analizadas, **Pseudomonas protegens (PROM2)** mostró la mayor eficiencia, alcanzando una remoción de **91.5 ± 0.7 %** del contaminante en tan solo 10 días.

Este resultado es relevante porque demuestra que no es necesario introducir bacterias foráneas: las cepas autóctonas ya están adaptadas al entorno y son más efectivas por su resiliencia ambiental (Torres et al., 2023).

**3.2 Biorremediación de metales pesados (mercurio y arsénico)**

En regiones mineras como **Arequipa, Huancavelica y Puno**, se ha detectado la presencia de metales pesados como el **mercurio (Hg)** y el **arsénico (As)** en suelos, aguas subterráneas y alimentos. Esto representa un riesgo directo para la salud humana y animal.

Un estudio reciente demostró que las bacterias nativas **Kocuria sp.** y **Zhihengliuella sp.**, aisladas de suelos contaminados con mercurio, fueron capaces de remover entre **28 % y 33 %** del metal en un periodo de 45 días. Lo más interesante fue que la mayor parte de la remoción ocurrió en las primeras **24 horas**, indicando una capacidad de adsorción y detoxificación muy rápida (Paredes et al., 2021).

**Síntesis de esta sección**

| **Contaminante** | **Microorganismo nativo** | **Zona** | **Eficiencia** | **Tipo de remediación** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Diésel | *Pseudomonas protegens* PROM2 | Huamachuco (La Libertad) | 91.5 % en 10 días | Bioaumentación |
| Mercurio (Hg) | *Kocuria sp.*, *Zhihengliuella sp.* | Arequipa/Puno | 28–33 % en 45 días | Bioaumentación |
| Arsénico (As) | Diversas bacterias resistentes | Áncash (Huarmey) | Estudio en desarrollo | Inmovilización biológica |

1. Estado de gestión de residuos y aguas en el Perú

La eficacia de cualquier estrategia de biorremediación depende en gran medida del contexto ambiental y del nivel de gestión de residuos y aguas en el país. En Perú, si bien se han logrado avances en la gestión ambiental, aún persisten importantes brechas estructurales, principalmente en las zonas rurales y urbano-marginales. Estas condiciones hacen urgente la implementación de tecnologías sostenibles como la biorremediación.

**4.1 Aguas residuales: tratamiento deficiente y desigual**

Uno de los principales problemas ambientales del país es el **bajo tratamiento de aguas residuales**. Según datos del Ministerio del Ambiente (MINAM), **aproximadamente el 70 % de las aguas servidas del país no recibe ningún tipo de tratamiento antes de ser vertidas en cuerpos de agua naturales** como ríos, lagunas o el mar.

-En zonas urbanas, especialmente en Lima y el Callao, se concentra la mayor parte de las plantas de tratamiento funcionales.

- En cambio, en regiones como Loreto, Ucayali o Puno, gran parte de las aguas residuales se descargan sin tratamiento, afectando a poblaciones rurales e indígenas.

**4.2 Residuos sólidos: generación creciente, manejo limitado**

Cada año, el Perú genera más de **8.45 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU)**. Sin embargo, **solo el 61.8 %** de estos residuos son dispuestos adecuadamente en rellenos sanitarios, mientras que el resto termina en **botaderos informales o áreas no autorizadas**, muchas veces cerca de cuerpos de agua o zonas agrícolas.

| **Indicador** | **Valor (2023)** |
| --- | --- |
| RSU generados anualmente | 8,455,615 toneladas |
| Porcentaje dispuestos en relleno | 61.8 % |
| Porcentaje en botaderos | 38.2 % |
| Municipios sin sistema formal | Más del 70 % en zonas rurales |

**4.3 Exposición a metales pesados en poblaciones vulnerables**

La exposición a metales como arsénico, plomo, mercurio y cadmio es un problema crítico en varias regiones mineras del Perú. Estudios realizados por DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental) y organizaciones como CENSOPAS han demostrado que **al menos el 30 % de las personas que viven cerca de zonas mineras presentan niveles peligrosos de metales pesados en sangre u orina**.

-**Huarmey (Áncash)**: presencia de arsénico en agua potable hasta 9 veces el límite permitido por la OMS.

- **La Oroya (Junín)**: históricamente una de las ciudades más contaminadas del mundo por plomo y dióxido de azufre.

**5. Aplicaciones y casos de éxito en biorremediación en Perú**

Aunque en el Perú la biorremediación aún no se aplica a gran escala como en países más industrializados, se han desarrollado diversos proyectos exitosos —especialmente desde instituciones universitarias, gobiernos locales y ONGs— que demuestran el potencial de esta tecnología en distintos escenarios de contaminación ambiental.

**5.1 Remediación de suelos contaminados por minería: Cerro de Pasco y La Oroya**

En zonas con actividad minera intensiva, como **Cerro de Pasco** y **La Oroya (Junín)**, los suelos presentan altos niveles de **plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As)** y otros metales pesados. Investigadores de la Universidad Nacional del Centro del Perú han probado técnicas de **bioaumentación** con bacterias resistentes aisladas de la misma zona para inmovilizar estos metales.

En un experimento de campo con suelos contaminados por plomo, el uso de la bacteria Bacillus cereus redujo la **movilidad del metal hasta en un 45 % en 30 días**, limitando su absorción por cultivos.

Este tipo de intervención es fundamental en comunidades expuestas crónicamente a la contaminación, donde no es viable remover ni reemplazar el suelo afectado.

✅ **Impacto**: Mejora la seguridad alimentaria y reduce riesgos de salud sin requerir maquinaria pesada ni químicos agresivos.

**5.2 Biorremediación de cuerpos de agua contaminados: caso del Lago Titicaca**

El **Lago Titicaca**, compartido entre Perú y Bolivia, sufre una grave contaminación por aguas residuales domésticas y metales pesados provenientes de la minería informal. En el lado peruano (Puno), investigadores del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y la Universidad Nacional del Altiplano realizaron estudios piloto para aplicar **biofiltros** con bacterias autóctonas capaces de **reducir la carga orgánica y niveles de nitrógeno y fósforo** en el agua.

Se reportaron mejoras en la calidad del agua superficial en zonas intervenidas, con **una reducción del 60 % de DBO (demanda biológica de oxígeno)** y mejoras en la biodiversidad de peces y macroinvertebrados.

💧 Este caso representa un modelo replicable en lagunas altoandinas y otros ecosistemas lacustres contaminados.

**5.3 Fitorremediación con apoyo microbiano en suelos agrícolas: Cajamarca y Áncash**

Proyectos de **fitorremediación asistida** han sido probados en terrenos agrícolas afectados por lixiviados mineros. En la región **Cajamarca**, se combinaron cultivos de **vetiver (Chrysopogon zizanioides)** con bacterias del género Pseudomonas para recuperar suelos con presencia de arsénico y zinc.

Después de 90 días de tratamiento, se logró una **disminución del 35–50 %** en las concentraciones de metales pesados en el suelo.

Además, se observó un aumento de biomasa vegetal y recuperación parcial de la fertilidad del suelo.

🌱 Este enfoque es ideal para zonas rurales donde se busca recuperar terrenos para cultivo sin causar más daño al ecosistema.

**Resumen de aplicaciones exitosas**

| **Región** | **Problema** | **Solución aplicada** | **Resultados** |
| --- | --- | --- | --- |
| Cerro de Pasco | Suelo con metales pesados | Bioaumentación con *Bacillus cereus* | Reducción de movilidad de Pb en 45 % |
| Puno | Contaminación del Lago Titicaca | Biofiltros con bacterias nativas | Reducción de DBO en 60 % |
| Cajamarca | Suelo agrícola contaminado | Fitorremediación con vetiver + bacterias | Reducción de As y Zn en 50 % |
| Piura | Suelo con hidrocarburos | Biopilas con residuos agrícolas | Degradación de diésel en 80–90 % |

6.Desafíos y perspectivas para la biorremediación en el Perú

Aunque la biorremediación se presenta como una alternativa ecológica, económica y eficiente para enfrentar la contaminación, su implementación en el Perú enfrenta múltiples obstáculos de carácter técnico, institucional, educativo y social. Identificar estos retos y proponer soluciones realistas es fundamental para consolidar esta estrategia como política ambiental a largo plazo.

**6.1 Limitaciones técnicas y científicas**

Uno de los principales desafíos es el **desarrollo limitado de investigación aplicada y tecnología adaptada a los ecosistemas peruanos**. Aunque existen universidades y centros como el Instituto Geofísico del Perú (IGP), CENSOPAS o algunos laboratorios regionales que investigan microorganismos autóctonos, el acceso a infraestructura avanzada, cultivos puros, reactores biológicos y análisis genéticos aún es restringido.

Además:

La mayoría de los estudios son **a escala laboratorio o piloto**, y pocos se han llevado a escala industrial o territorial.

No hay un banco nacional de microorganismos nativos degradadores, lo que retrasa la selección de cepas efectivas.

Muchos sitios contaminados (como suelos mineros, botaderos y ríos urbanos) **contienen mezclas complejas de contaminantes**, lo que dificulta la acción de una sola especie microbiana.

**6.2 Barreras normativas e institucionales**

Actualmente, el marco normativo peruano **reconoce la biorremediación como alternativa ambiental**, pero su regulación es dispersa, poco específica y varía entre sectores (minería, agricultura, residuos sólidos).

-No existe aún un **protocolo nacional oficial de aplicación de biorremediación** ni estándares de evaluación de su eficacia.

-Muchos gobiernos locales carecen de personal capacitado para evaluar propuestas de biorremediación o integrarlas en planes de remediación ambiental.

Además, la autorización de actividades de biotecnología ambiental puede ser lenta y burocrática, lo que **desincentiva la inversión de empresas o emprendimientos locales**.

**conclucion**

La contaminación del ambiente, causada por nuestras propias actividades —como la minería, la industria o el mal manejo de residuos—, es un problema que ya no podemos ignorar. En este contexto, la biodegradación y la biorremediación se presentan como alternativas viables, sostenibles y naturales para ayudar a recuperar los ecosistemas dañados. Estas estrategias aprovechan el trabajo de microorganismos como bacterias y hongos que, de forma sorprendente, pueden descomponer contaminantes y transformar sustancias tóxicas en otras más simples y seguras para el medio ambiente.

En el Perú, donde enfrentamos graves problemas de contaminación en zonas como la sierra central o la Amazonía, estas soluciones podrían tener un impacto muy positivo. Ya hay algunos casos donde se están usando microorganismos nativos para limpiar ríos o suelos afectados por residuos mineros o agrícolas, lo que demuestra que sí es posible aplicar este tipo de tecnología en nuestro propio territorio.

Eso sí, aún hay muchos retos por superar: falta más investigación, mejor apoyo del Estado, normativas claras y sobre todo, mayor difusión para que más personas conozcan y confíen en estas soluciones. Si logramos integrar a las comunidades, a los científicos, a los gobiernos y a los jóvenes estudiantes en esta causa, la biorremediación no solo será una herramienta técnica, sino también una esperanza real para sanar nuestros ecosistemas y construir un futuro más limpio y sostenible.