



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Aplicación de biosurfactantes producido por *Bacillus* en la
remediación de suelos contaminados con metales pesados:
Revisión sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

Irigoin Gonzales, Jose Luis (ORCID: 0000-0001-7084-0951)

ASESOR:

Dr. Lozano Sulca, Yimi Tom (ORCID: 0000-0002-0803-1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, hermano Lizandro Irigoin Gonzales y familiares por su empeño y dedicación con mi preparación.

A mi tutor por su tiempo valioso.

A mis amigos y compañeros de estudio por su ayuda desinteresada

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro asesor, quien con sus conocimientos y tiempo nos dio esa motivación día a día para poder alcanzar los resultados que buscaba, a mi familia por el apoyo incondicional y por habernos apoyado en la titulación

ÍNDICE DEL CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
V. CONCLUSIONES.....	33
VI. RECOMENDACIONES	34
REFERENCIAS.....	35
ANEXOS.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de carcinogenicidad por metales pesados	8
Tabla 2.	Cuadro de antecedentes	13
Tabla 3.	Matriz de categorización apriorística	19
Tabla 4.	Bacillus más utilizados para remediar suelos con iones metálicos	24
Tabla 5.	Efecto del pH del suelo en la absorción de metales pesados	27
Tabla 6.	Propiedades físico-químicas del suelo antes y después de la biorremediación	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Principales fuentes de contaminación de los metales pesados	4
Figura 2.	Vía de la fuente de metales pesados y exposición humana.....	6
Figura 3.	Papel de los biosurfactantes en la biorremediación de metales pesados de ambientes contaminados	9
Figura 4.	Mecanismo de eliminación de metales pesados del suelo contaminado mediante biosurfactantes.....	11
Figura 5.	Reacción química entre suelo contaminado con metales pesados, agua y biotensioactivo	12

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Procedimiento de selección de artículos	21
Gráfico 2.	Biosurfactantes a base de bacteria Gram - positivas y su porcentaje de remoción	30
Gráfico 3.	Biosurfactantes a base de bacteria Gram - negativas y su porcentaje de remoción	31

RESUMEN

La presente investigación presentó como objetivo definir los aspectos más relevantes de los biosurfactantes producidos por *Bacillus* en la remediación de suelos contaminados con metales pesados, así como determinar el grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados, analizar las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados e identificar los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción de metales pesados; para lo cual se realizó una recolección de 106 literaturas de las cuales 20 cumplieron con los criterios propuestos.

De acuerdo con los objetivos planteados se obtuvo: El grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes son cepas bacterianas Gram positivas, representado por el 67% de los investigadores, donde la bacteria *Bacillus subtilis* es el más empleado para la elaboración de biosurfactantes. Las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados son el pH, la capacidad de retención de agua, la actividad deshidrogenasa del suelo y el carbono orgánico total, debido a que el biosurfactante afecta principalmente la actividad enzimática al cambiar las propiedades fisicoquímicas del suelo y liberar algunas moléculas pequeñas que se consideran como reguladores alostéricos o inhibidores de enzimas específicas y los parámetros TOC, WHC, DH y pH del suelo presentan una relación lineal donde la disminución o aumento implican el papel positivo del biosurfactante producido por bacillus en la biorremediación del suelo. Los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción son las cepas bacterianas Gram positivas presentando un mayor porcentaje de remoción de metales pesados del suelo en un 50 a 80%; mientras que el porcentaje de remoción de los biosurfactantes elaborados por bacterias Gram negativas varía en un 20 a 50%.

Palabras clave: biosurfactante, bacteria, bacilo, suelo, contaminado, metales pesados, características.

ABSTRACT

The aim of this research was to define the most relevant aspects of the biosurfactants produced by *Bacillus* in the remediation of soils contaminated with heavy metals, as well as to determine the group of *Bacillus* most used for the production of biosurfactants in the remediation of soils contaminated with heavy metals, to analyse the physicochemical characteristics of soil contaminated with heavy metals and to identify the biosurfactants produced by *Bacillus* with the highest percentage of heavy metal removal; For this purpose, 106 literatures were collected, of which 20 fulfilled the proposed criteria.

According to the proposed objectives, the following was obtained: The group of *Bacillus* most used for the production of biosurfactants are Gram-positive bacterial strains, represented by 67% of the researchers, where the bacterium *Bacillus subtilis* is the most used for the production of biosurfactants. The physicochemical characteristics of heavy metal contaminated soil are pH, water holding capacity, soil dehydrogenase activity and total organic carbon, because the biosurfactant mainly affects the enzymatic activity by changing the physicochemical properties of the soil and releasing some small molecules which are considered as allosteric regulators or inhibitors of specific enzymes and the parameters TOC, WHC, DH and pH of the soil show a linear relationship where the decrease or increase implies the positive role of the biosurfactant produced by *Bacillus* in soil bioremediation. The biosurfactants produced by *Bacillus* with the highest percentage of removal are the Gram-positive bacterial strains presenting a higher percentage of removal of heavy metals from the soil by 50 to 80%; while the percentage of removal of biosurfactants produced by Gram-negative bacteria varies from 20 to 50%.

Keywords: biosurfactant, bacteria, *Bacillus*, soil, contaminated, heavy metals, characteristics.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por metales pesados es una preocupación ambiental en todo el mundo, donde la mayoría de los microorganismos del suelo autóctonos no pueden descomponer los metales pesados y su existencia a largo plazo en el suelo representa una grave amenaza para la salud humana (Zhang Junhui et al., 2018, p.1).

Hasta la fecha, los metales pesados como Cd, Pb y Cu han demostrado ser perjudiciales en todo el mundo y han planteado diferentes síntomas nocivos de intoxicación por metales pesados, incluidos dolor de cabeza, temblor, lesión renal y anemia. (Zhang Y. y Wang X., et al., 2020, p.2). El consumo de una gran cantidad de Cd puede causar tos, molestias en el pecho, disnea, mareos, náuseas, debilidad de las extremidades, fiebre e incluso la muerte (Cui Jian, et al., 2019, p.1).

La intoxicación por Cu puede provocar síntomas como náuseas, vómitos, dolor epigástrico y diarrea (Tu Chen, et al., 2020, p.1). Para reducir o prevenir estos efectos nocivos, es fundamental remediar el suelo contaminado por metales pesados (Lee SuMin, et al., 2016, p.1). La lixiviación del suelo, que es altamente eficiente, fácil de operar y de bajo costo, se ha utilizado ampliamente para eliminar metales pesados de suelos contaminados (Tang Jian et al., 2017, p.3).

Debido a la gravedad de la contaminación por metales pesados en ciertas partes del medio ambiente, los biosurfactantes han ganado gran interés y atención como una tecnología multifuncional emergente del nuevo siglo para la eliminación exitosa de los contaminantes por metales pesados (Mishra Sandhya et al., 2021, p.2).

En la actualidad, los agentes químicos, incluidos los ácidos orgánicos y los quelatos, se utilizan comúnmente en la lixiviación del suelo (Sun Wuyang et al., 2021, p.2). Sin embargo, el mayor costo y el daño grave resultante a la estructura del suelo limitan su aplicación, por lo tanto, es necesario encontrar un sustituto ecológico, de bajo costo y de alta eficiencia (Wu Chuncheg et al., 2020, p.1).

El biosurfactante es un producto microbiano anfifílico, que juega un papel clave en el proceso de remediación de suelos contaminados con diversos contaminantes como metales pesados (MH), hidrocarburo de petróleo (HP), entre otros (Liu Qi, et al., 2021, p.1). Además, el biosurfactante tiene ventajas de ser amigable con el medio ambiente

en comparación con los surfactantes a base de petróleo debido a su mayor biodegradabilidad y menor toxicidad (Akbari Sweeta et al., 2018, p.2).

Los biosurfactantes son compuestos activos que se producen en la superficie de la célula microbiana o se excretan y reducen la tensión superficial e interfacial (Costa Jorge AV, et al., 2018, p.2). Los tensioactivos microbianos ofrecen varias ventajas sobre los sintéticos, como baja toxicidad y alta biodegradabilidad, y permanecen activos a pH y salinidad extremos (De Rienzo Ma Díaz, et al., 2016, p.1). Son considerados tecnologías remediadoras debido a sus aplicaciones por amplias industrias y sus aplicaciones como tecnologías remediadoras (Fernandes P.L, et al., 2016, p.1).

Los biosurfactantes son producidos por bacterias, levaduras y hongos filamentosos (Abacha Yabalu et al., 2016, .1). En tal sentido los *Bacillus* son considerados como fuente potencial de biosurfactantes y producen compuestos como surfactina, ramnolípidos y soforolípidos (Kapellos G., 2017, p.1).

Debido a la realidad problemática tratada se plantea el siguiente problema general: ¿Cuáles son los aspectos más relevantes de los biosurfactantes producidos por *Bacillus* en la remediación de suelos contaminados con metales pesados? Desplegando así los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuál es el grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados?

PE2: ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados?

PE3: ¿Cuáles son los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo?

De igual manera se elaboró el objetivo general: Definir los aspectos más relevantes de los biosurfactantes producidos por *Bacillus* en la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Como objetivos específicos se tiene a:

OE1: Determinar el grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados.

OE2: Analizar las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados.

OE3: Identificar los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo.

Así mismo la presente revisión sistemática se justifica teóricamente, ya que, busca brindar información actualizada y amplia de diversos investigadores para ampliar los conocimientos y despertar interés en los futuros tesis, para la eliminación exitosa de los contaminantes por metales pesados empleando una tecnología nueva y amigable con el medio ambiente, como lo es los biosurfactantes producido por *Bacillus*.

II. MARCO TEÓRICO

La civilización moderna depende completamente de una gran variedad de metales para todos los aspectos de la vida cotidiana. Existe una larga historia de asociación entre los metales y el desarrollo humano, sin embargo, debido a la minería, los minerales, la fundición y la industria del curtido, la contaminación por metales pesados se ha convertido en algo serio (Beattie Rachelle E. et al., 2018, p.1). La contaminación por metales pesados no sólo afecta a la producción y la calidad de los cultivos, sino que también influye en la calidad de la atmósfera y las masas de agua, y amenaza la salud y la vida de los animales y los seres humanos (Kumar, 2008). Varios investigadores han identificado claramente la influencia de la actividad humana como una de las principales causas de contaminación del ecosistema (Xiang Mingtao et al., 2021, p.3).

Desde la revolución industrial, los impactos antropogénicos han provocado una liberación de metales pesados cada vez más peligrosa en el medio ambiente. Los suelos, al ser la parte básica y más esencial del sistema ecológico, también están muy contaminados (Sun Wuyang et al., 2021, p.1).

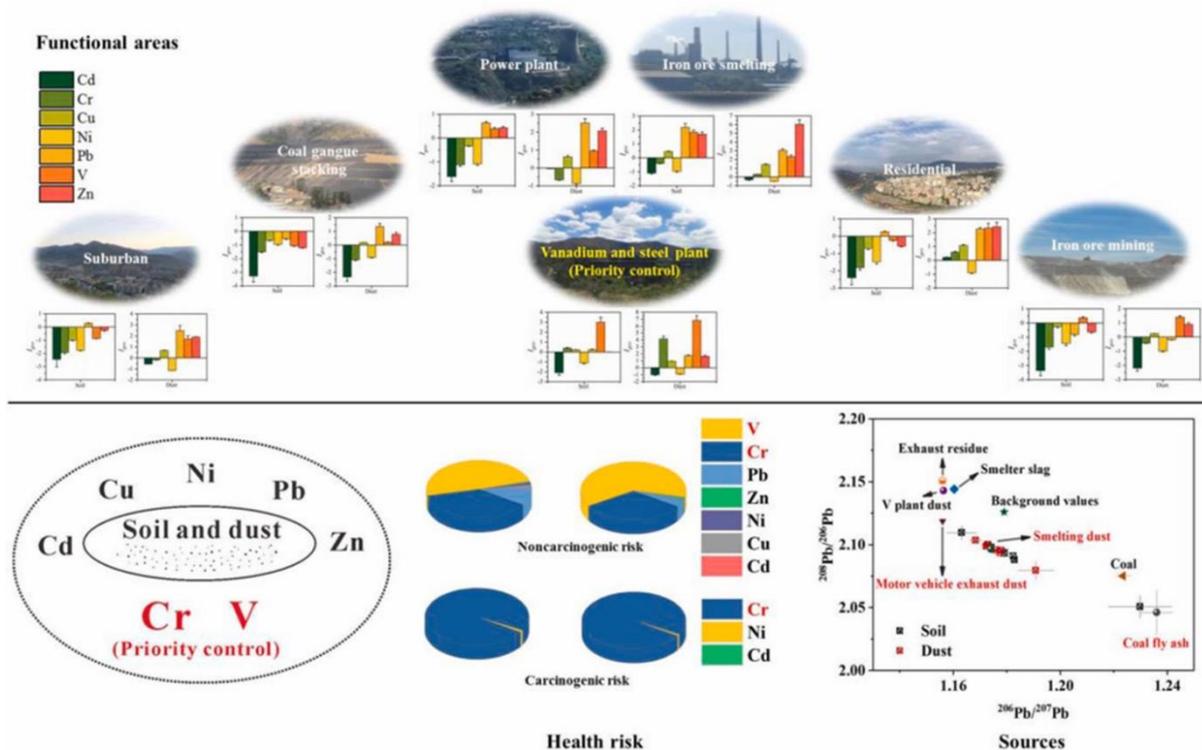


Figura 1. Principales fuentes de contaminación de los metales pesados

Fuente: Longh Zhije et al., 2021

De acuerdo con la figura 1 en el estudio de Longh Zhije et al., (2021, p.1) se mostró que la contaminación de los metales V y Cr en la planta de vanadio / acero (VSA) y la contaminación de Cd, Pb y Zn en el mineral de hierro de fundición (IsA) fueron significativamente mayores en relación con otras áreas funcionales. Concluyendo que las fuentes de los metales pesados contaminados en el suelo y el polvo procedían principalmente de la fundición y fabricación de productos de vanadio / acero, la combustión de carbón y el tráfico.

En países como china las tierras han sido contaminadas por metales pesados como el Sn, el Cr, el Pb y el Zn, que representan casi una quinta parte de la superficie agrícola total. Cada año, China sufre una pérdida de 10.000.000 de toneladas de producción agrícola debido al deterioro de la contaminación por metales pesados (Obiri Franklin et al., 2021, p.1).

A diferencia de otros contaminantes orgánicos los metales pesados peligrosos son indestructibles, ya que no pueden ser degradados química o biológicamente (Ali Amjad et al., 2017, p.1). Aún peor, algunos metales pesados pueden concentrarse a lo largo de la cadena alimentaria y acabar acumulándose en el cuerpo humano porque estamos en la cima de la cadena alimentaria (Wu Yingxin et al., 2021, p.1).

Los metales se consideran uno de los contaminantes ambientales más peligrosos, porque no se desintegran con los procesos físicos y, por tanto, permanecen durante mucho tiempo (Wang Xia et al., 2020, p.2). Afectan a los ciclos biogeoquímicos y se acumulan en los organismos vivos, llegando finalmente a los humanos a través de la cadena alimentaria, donde pueden causar perturbaciones en las reacciones biológicas, daños duraderos en los órganos vitales o incluso la muerte (Sarwar Nadeem et al., 2017, p.1).

Los suelos que tienen un alto contenido de estos metales tóxicos son perjudiciales para las plantas y los animales, ya que el material de origen natural de los metales pesados es un material que se encuentra en el suelo como para los animales, ya que el material parental tiene naturalmente altas concentraciones de estos metales (Bore Ezekiel K. et al., 2017, p.2).

La ingestión, la inhalación y el contacto con la piel son las principales vías de exposición humana a los metales del suelo (Fang Linchuan et al., 2017, p.3). Dado

que el suelo es el principal sumidero de los metales transportados por el aire, la medición de sus niveles en este medio es útil para establecer tendencias de abundancia y sus consecuencias debido a los cambios naturales y antropogénicos (Jin Yuyao et al., 2018, p.4).

En la Figura 2 se puede ver una ruta que muestra las consecuencias de la contaminación por metales pesados.

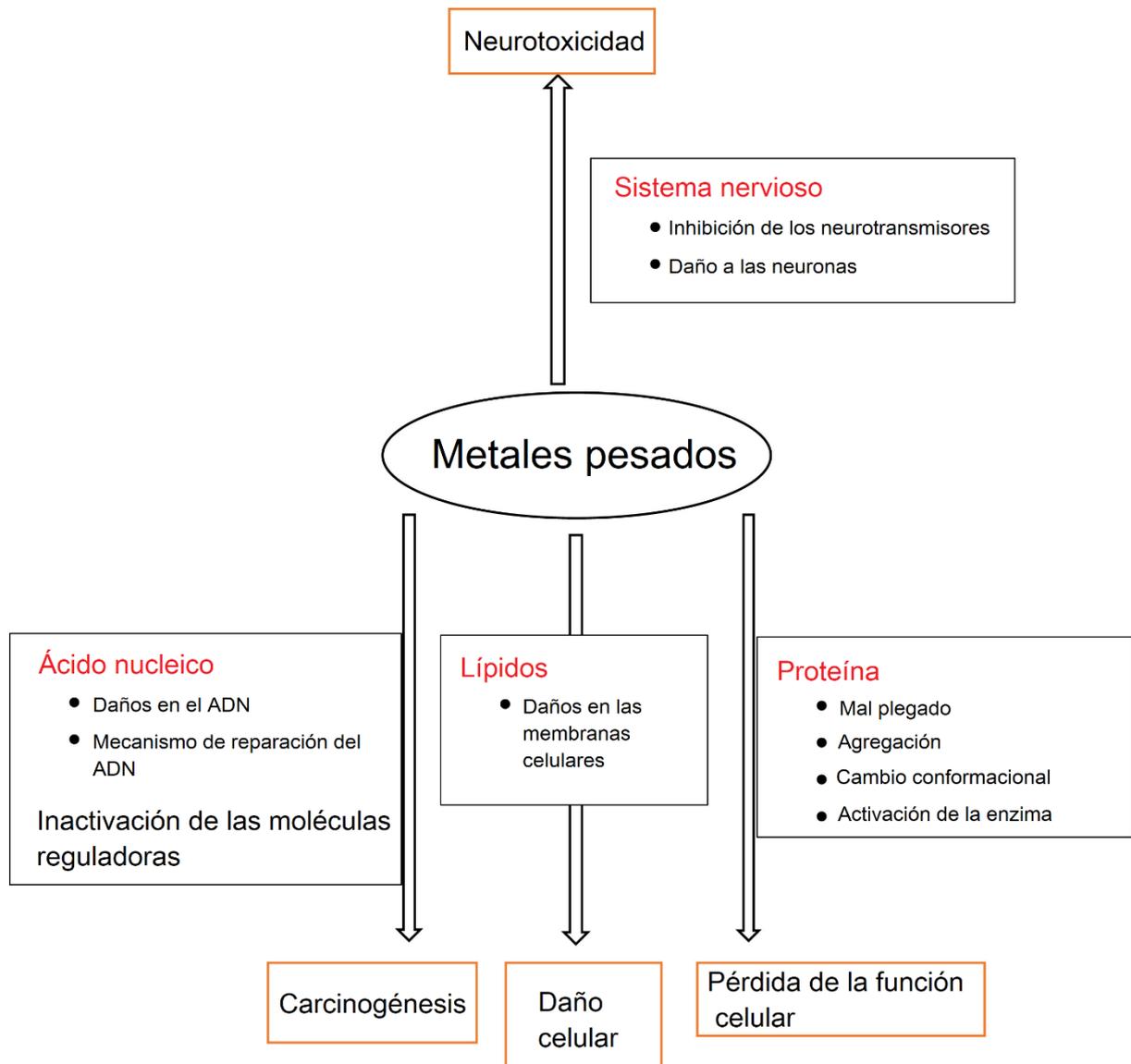


Figura 2. Vía de la fuente de metales pesados y exposición humana

Fuente: Extraído y modificado de Briffa Jessica S. et al., 2020

Se ha informado que los orgánulos celulares y los componentes de la célula se ven afectados por metales pesados, como las mitocondrias, los núcleos, los lisosomas, la membrana celular y las enzimas. Se ha descubierto que los iones metálicos

interactúan con el ADN y las proteínas nucleares, lo que provoca daños en el ADN y, en consecuencia, conduce a la modulación del ciclo celular, la apoptosis o la carcinogénesis (Masindi Vhahangwele M. et al., 2018, p.1).

Los metales peligrosos como el Pb, Zn y Cd participan en los ciclos biogeoquímicos y su movilidad depende en gran medida de sus formas químicas más que de la concentración total del elemento (Zeng Ling et al., 2021, p.1). La especiación de los metales puede ayudar a evaluar la intensidad con la que se retienen en el suelo y la facilidad con la que pueden liberarse en la solución del suelo (Shen Feng et al., 2017, p.1).

Así también, el exceso de todos los metales puede ser fuente de enfermedades como los metales esenciales son esenciales para el cuerpo y tanto el exceso como la deficiencia pueden afectar al cuerpo humano (Jiang Bo et al., 2019, p.1). Las deficiencias son causadas generalmente por malabsorción que pueden ser causadas por un estado diarreico (Tóth G. et al., 2016, p.2).

Por el contrario, el exceso de metal y sus efectos de toxicidad dependen de ciertos factores como la ingestión o inhalación del metal, la velocidad de entrada del metal, la distribución tisular y la concentración alcanzada y, por último, la velocidad de excreción del metal (Comero S. et al., 2016, p.1). Los mecanismos de toxicidad comprenden la inhibición de la actividad enzimática, la síntesis de proteínas, las variaciones en la función del ácido nucleico y los cambios en la permeabilidad de la membrana celular (Liu Peng et al., 2020, p.7).

Además, las sustancias pueden clasificarse en diferentes grupos según estén clasificadas como cancerígenas o no; donde la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) los ha clasificado en cuatro grupos (Ver Tabla N°1).

Grupo	Nivel de carcinogenicidad en humanos	Evidencia	Clasificación de metales pesados
Grupo 1	Carcinogénico	Evidencia suficiente en humanos	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de aluminio • Compuestos inorgánicos y de arsénico • Cadmio y compuestos de cadmio • Compuestos de cromo VI • Compuestos de níquel

			<ul style="list-style-type: none"> Refinado de níquel
Grupo 2A	Probablemente cancerígeno	Evidencia limitada en humanos, evidencia suficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> Compuestos de plomo inorgánicos
Grupo 2B	Posiblemente cancerígeno	Evidencia limitada en humanos, evidencia insuficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> Pentóxido de vanadio Trióxido de molibdeno Metilmercurio Níquel metálico y aleaciones Dirigir Cobalto
Grupo 3	Carcinogenicidad no clasificable	Evidencia insuficiente en humanos, evidencia suficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> Compuestos de cromo III Compuestos metálicos de cromo Cobre Mercurio y compuestos inorgánicos de mercurio Selenio y compuestos de selenio Arsénico Compuestos orgánicos de arsénico no metabolizados por humanos
Grupo 4	Probablemente no cancerígeno	La evidencia sugiere que no hay propiedades cancerígenas en humanos o animales.	<ul style="list-style-type: none"> Manganeso Plata Zinc

Tabla 1. Clasificación de carcinogenicidad por metales pesados

Fuente: *Brunning A., 2019*

Debido a ello, se han desarrollado y aplicado muchas estrategias convencionales para descontaminar y restaurar áreas contaminadas con metales, sin embargo, estos enfoques convencionales no son muy adecuados y ambientalmente seguros para la remediación de metales pesados debido a sus altos costos operativos, altos requisitos de energía, problemas de eliminación posterior a los desechos y generación de contaminantes secundarios (Zhuang Mei et al., 2019, p.3). Por lo tanto, la biorremediación de metales pesados basada en biosurfactantes es un enfoque sostenible y prometedor debido a su capacidad de biodegradación, eficacia económica y naturaleza ecológica.

Los tensioactivos microbianos o biosurfactantes son moléculas anfifílicas producidas por varios microorganismos (Imran Muhammad et al., 2016, p.2). Se encuentran en la naturaleza como un grupo diverso de moléculas que comprenden glicolípidos, lipopéptidos y lipoproteínas, ácidos grasos, lípidos neutros, fosfolípidos y biosurfactantes poliméricos y particulados (Chun Seong Ju et al., 2021, p.2). Son producidos principalmente por microorganismos que utilizan hidrocarburos y presentan una actividad superficial (Sun Wuyang et al., 2018, p.2).

Casi todos los tensioactivos que se producen actualmente son derivados del petróleo, sin embargo, estos tensioactivos sintéticos suelen ser tóxicos y apenas son degradados por los microorganismos (Nour Hamdy E. et al., 2019, p.1). Por lo tanto, estos peligros asociados a los tensioactivos sintéticos han hecho que en los últimos años se preste mucha atención a la producción microbiana de tensioactivos (Araújo Larissa et al., 2021, p.1).

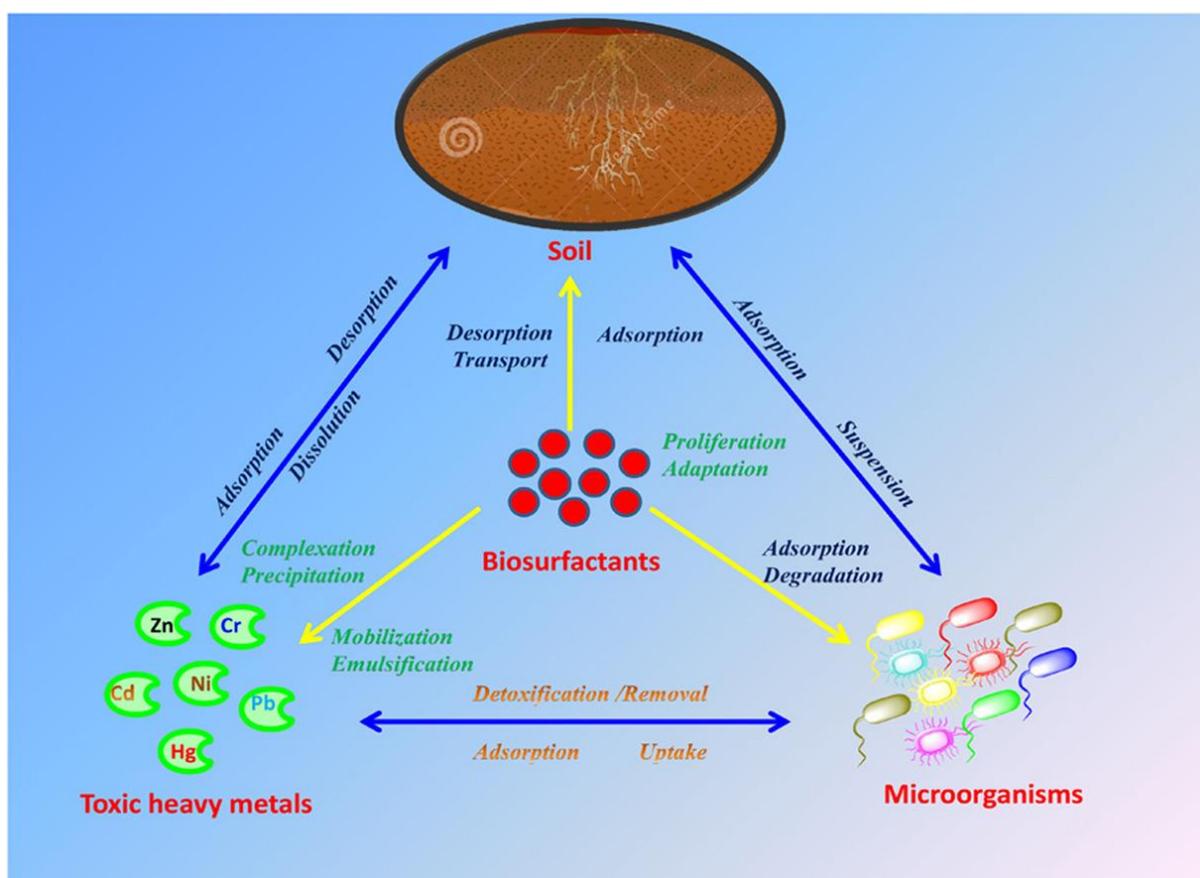


Figura 3. Papel de los biosurfactantes en la biorremediación de metales pesados de ambientes contaminados

Fuente: Mishra San dhya et al., 2021

Como se muestra en la figura 3, se discute el mecanismo de interacción subyacente a la complejación de biosurfactante-metal y la remediación de metales.

Recientemente, la mayoría de los estudios se centran en las aplicaciones ambientales de los biosurfactantes debido a su estructura diversa, mejores propiedades fisicoquímicas, características amigables con el medio ambiente, idoneidad para muchos propósitos que incluyen la remediación de compuestos orgánicos hidrofóbicos (HOC) del suelo y la eliminación de pesados metales del suelo contaminado (Liu Zhifeng et al., 2017, p.3).

Además, son fáciles de producir, más baratos y renovables (Lian Meihua et al., 2019, p.2). Las sorprendentes ventajas de los biosurfactantes sobre los compuestos tensioactivos de síntesis química incluyen también su amplia gama de novedosas características estructurales y propiedades físicas y su capacidad de ser modificados por ingeniería genética, así como por técnicas biotecnológicas o bioquímicas (Lal Shatrohan et al., 2018, p.1).

En el pasado, se habían utilizado tensioactivos químicos para tratar suelos contaminados con metales pesados y solubilizar los HOC. Sin embargo, se sabe que los surfactantes químicos en sí mismos exponen sustancias tóxicas y pueden causar otros problemas ambientales debido a su degradabilidad en el suelo (Santos Danyelle K. et al., 2016, p.2). En comparación con los tensioactivos químicos, los biotensioactivos derivados de plantas y microorganismos han mostrado un mejor rendimiento que se considera adecuado para eliminar metales pesados del suelo contaminado (Luna Juliana M. et al., 2016, p.1).

Además, los biosurfactantes suelen ser producidos por microbios (por ejemplo, bacterias, hongos y levaduras) e incluyen glicolípidos, lipoproteínas, fosfolípidos y polímeros (Liu Guansheng et al., 2018). Donde bacterias como *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Citrobacter freundii* y *Candida* son fuentes potenciales de biosurfactantes y producen compuestos como surfactina, ramnolípidos y soforolípidos (Akbari Sweeta et al., 2018, p.3).

Así también, se han utilizado diferentes tipos de fuentes de carbono y nitrógeno para la producción de biosurfactantes (Mahamallik P. y Pal A., 2017, p.4). El gasóleo, la gasolina, el petróleo crudo, glucosa, sacarosa y glicerol son buenos sustratos (Yang

Zhihui et al., 2018, p.1). Mientras tanto, peptona, extracto de levadura, sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄) y nitrato de amonio (NH₄NO₃) pueden utilizarse como fuentes de nitrógeno y la naturaleza del sustrato de carbono afecta a la calidad y la cantidad de biosurfactante producido (Lu Biao et al., 2017, p.2).

El mecanismo de eliminación de metales pesados del suelo contaminado utilizando biosurfactantes iónicos se muestra en la figura 4.

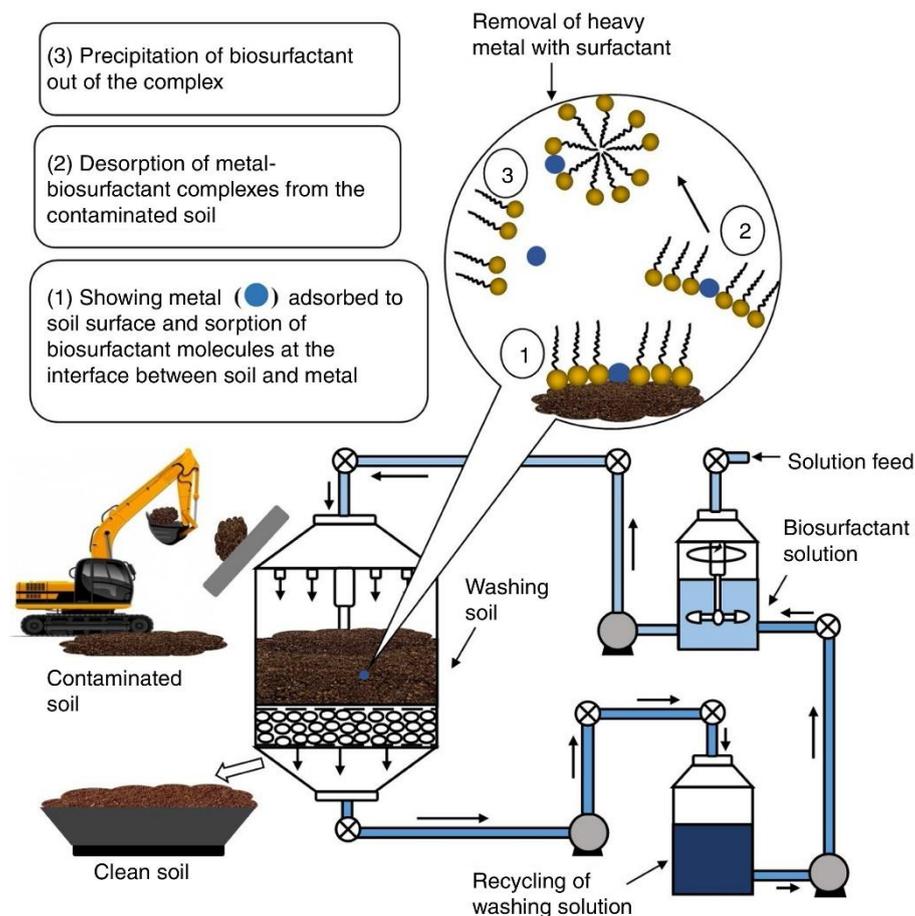


Figura 4. Mecanismo de eliminación de metales pesados del suelo contaminado mediante biosurfactantes.

Fuente: Guan Repeng et al., 2017

De acuerdo con la figura 4, se demuestra esencialmente los 3 pasos principales involucrados en la eliminación de metales pesados del suelo mediante el lavado con una solución de biosurfactante.

Los metales pesados adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo se separan mediante la sorción de moléculas de biotensioactivo en las interfaces entre el lodo (suelo húmedo) y el metal en solución acuosa, luego, el metal será absorbido

por biosurfactantes y atrapado dentro de la micela a través de interacciones electrostáticas; finalmente, el biosurfactante se puede recuperar mediante el método de separación por membrana (Ibrahim Wael M. et al., 2016, p.5).

Además, limitando la fuente de nitrógeno, la producción de biosurfactante puede incrementarse, mientras que la suplementación con extracto de levadura (25%) y NaNO₃ (10%) da lugar a un escaso incremento del rendimiento de biosurfactante (Shaban S. y Abd-Elaal A., 2017, p.4).

Por ello, describir la reacción química entre los iones de metales pesados y el grupo funcional de biosurfactantes es esencial, dado que las partículas del suelo y otras materias orgánicas tienen cargas negativas en sus superficies, los materiales catiónicos se pueden adsorber fácilmente a las cargas negativas de la superficie del suelo, donde Meⁿ⁺ representa iones metálicos y R⁻ (COOH) son las moléculas de tensioactivo (Quadra Gabrielle R. et al., 2019, p.1) (Ver figura 5).

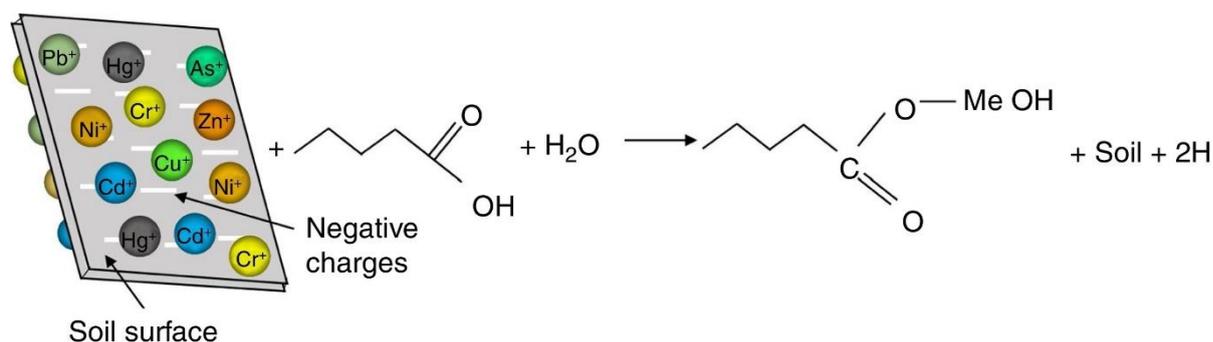


Figura 5. Reacción química entre suelo contaminado con metales pesados, agua y biosurfactante

Fuente: Tang Jian et al., 2017

Por otro lado, los biosurfactantes son estables incluso en condiciones extremas en una de pH, temperatura y salinidad (De Almeida Darne G. et al., 2016, p.1). El biosurfactante se ve afectada por varios factores que dependen del aislado, del medio (carbono, fuente de nitrógeno y salinidad) y de las condiciones operativas (pH, temperatura y velocidad de agitación) (Jiang Jingjing et al., 2020, p.1).

Estos factores influyen en la cantidad y el tipo de biosurfactante producido y los biosurfactantes podrían ser útiles en entornos extremos en sistemas industriales en los que las temperaturas extremas son elementos (Lamilla Claudio et al., 2021, p.1).

Como sustitutos de los agentes químicos de lixiviación, los biosurfactantes vienen atrayendo cada vez más atención porque no producen ningún contaminante secundario (Almansoori y Asia F. et al., 2017, p.2). Debido a ello se plasmó un conteo de los 17 antecedentes más sobresalientes, donde se muestra la aplicación de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados (Ver Tabla N°2).

Tabla 2. Cuadro de antecedentes

Autor	Objetivo	Metodología	Resultado
Sun Wuyang et al., 2021	Mejorar el rendimiento de producción de biosurfactantes de <i>Pseudomonas</i> sp. CQ2 aislado del campo petrolífero	Contaminación artificial y envejecimiento del suelo, preparación del lixiviado de <i>Pseudomonas</i> sp. CQ2, determinación de la producción de biosurfactantes y medición, optimización de la producción de biosurfactantes, experimentos por lotes de biolixiviación de suelos, extracción secuencial de metales pesados en el suelo, caracterización del suelo antes y después de la biolixiviación y análisis estadístico.	Las eficiencias de remoción de 78.7, 65.7 y 56.9% para Cd, Cu y Pb respectivamente se lograron en condiciones optimizadas de biolixiviación (pH: 11, relación suelo / solución: 30: 1 y suelo no esterilizado), pruebas comparativas entre surfactantes químicos comunes (SDS, Tween-80) y los biosurfactantes demostraron la mayor capacidad de eliminación de los biosurfactantes.
Yang Zhihui et al., 2018	Optimizar Z-90 combinando la biolixiviación por los biosurfactantes brutos de <i>Burkholderia Burkholderia</i> sp.	-La cepa se mantuvo a: pH: 1/4 7, 10 g/L de triptona, 5 g L1 de extracto de levadura, 10 g L1 de cloruro de sodio -Inoculación: 2mL de suspensión de la cepa en un matraz -Incubación: BBaño de gas a 35°C con 160 rpm por 5días para obtener el lixiviado.	Las eficiencias óptimas de eliminación de Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As por <i>Burkholderia</i> sp. Donde los lixiviados fueron 44.0, 32.5, 52.2, 37.7, 24.1 y 31.6%, respectivamente.
Mekwichai Pannawee et al., 2020	Investigar la fitotoxicidad de ramnolípidos (RL) y saponina (SP) en el maíz cultivado en suelos contaminados con Cd y determinar la concentración óptima de concentración óptima de biosurfactante para la fitoextracción.	-Solución de biosurfactante: 50 mL -Tiempo de crecimiento de brotes: 3 - 4 días -Concentración de Cd en plantas de maíz: después de 1 mes, añadiendo HNO3 concentrado y H2O2 en una proporción de 4:1 v/v.	Las eficiencias de eliminación de Cd el día 80 fueron del orden de SP (18,80%)> RL (11,33%)> control (4,59%); por 5 días.

Tang Jian et al., 2020	Explorar una forma más eficaz de reducir los metales tóxicos utilizando la técnica combinada de biosurfactante y electrocinética para promover la eliminación de metales tóxicos	Se utilizó la técnica combinada de biosurfactante y electrocinética para promover la eliminación de metales tóxicos. Durante el proceso electrocinético se investigaron el flujo electroosmótico (EOF), el contenido de agua del lodo, las variaciones de conductividad eléctrica de electrolitos y lodos, y la eficiencia de eliminación, distribución, especiación e intensidad de unión de las variaciones de metales pesados.	La distribución de metales pesados demostró que 58.63%, 71.34%, 63.04%, 52.95%, 61.74%, 56.24% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso migraron a la solución del electrodo, respectivamente, y 38.02%, 26.20%, 32.54%, 42,69%, 36,34%, 42,35% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso permanecieron en el lodo.
Li Qiqi Z. et al., 2020	La saponina del té (TS), un biosurfactante derivado de plantas, se utilizó para investigar su eficacia en la extracción de tres elementos de tierras raras típicamente seleccionados (REE, lantano ligero (La), punta de flecha media (Dy) y erbio pesado (Er)) de suelos contaminados, en presencia de importantes metales pesados tóxicos (plomo (Pb) y cadmio (Cd)).	-Incubación: 50% por 1 mes. -Concentración de Cd y Pb: 10 y 797 mg/kg -pH se ajustó usando HNO ₃ o NaOH agitación T° ambiente, centrifugado a 5000 rpm durante 5 minutos.	Las eficiencias de recuperación de La, Dy, Er, Cd y Pb alcanzaron 96,9%, 88%, 84,3%, 88% y 91,1% utilizando 0,3 g / g (Ca (OH) ₂ /tierra). Las eficiencias generales de extracción de La, Dy, Er, Cd y Pb fueron 53,9%, 73,2%, 71,7%, 95,9% y 38,8% tres veces usando la solución de TS recuperada.
Yang Zhihui et al., 2016	Aislar una cepa productora de biosurfactantes con capacidad de producción alcalina de lodos de alcantarillado de cafetería y se investigó su capacidad para eliminar Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As.	Se aisló una cepa productora de biosurfactantes con capacidad de producción alcalina de lodos de alcantarillado de una cafetería y se investigó su capacidad para eliminar Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As.	La eficiencia de remoción fue 44.0% para Zn, 32.5% para Pb, 52.2% para Mn, 37.7% para Cd, 24.1% para Cu y 31.6% para As, respectivamente. Mn, Zn y Cd se eliminaron más fácilmente del suelo que Cu, Pb y As, lo que se atribuyó a la presencia de una alta fracción soluble en ácido de Mn, Zn y Cd y una alta fracción residual de Cu, Pb y As.

Guo Yi-ming et al., 2017	Se investigaron las eficiencias de eliminación de Pb en niveles múltiples de relación agua-sólido, pH y fuerza iónica.	<p>-Tipo de suelo, franco arenoso</p> <p>-para determinar el contenido total de Zn, Pb, Mn, Cd y Cu se digirieron 0,5 g de suelo con una mezcla de ácidos (HCl, HNO₃) por 2 horas.</p> <p>-Placa de incubación: 48 horas a 30°C</p> <p>-Se inoculó en un matraz a 200 mL de caldo de Luria-Bertani.</p> <p>-Agitación de matraz en incubadora a 30°C 160 rpm por 24 h.</p> <p>-pH: 7</p>	El resultado mostró que la especiación intercambiable de Pb podría eliminarse mediante una capacidad máxima de eliminación de 76,8 mg / g después de la lixiviación.
Chen Qingguo et al., 2021	En este trabajo, dos metales pesados, plomo (Pb) y mercurio (Hg), en sedimento intermareal marino fueron removidos por RB preparado a escala de laboratorio.	Dos metales pesados, plomo (Pb) y mercurio (Hg), en sedimento intermareal marino fueron removidos por biosurfactante (RB) preparado a escala de laboratorio.	A una concentración micelar crítica de 43,73 mg L ⁻¹ , se extrajeron 62,50% de Pb y 50,20% de Hg de la muestra de sedimento intermareal marino que contenía 520,32 mg.kg ⁻¹ de Pb y 13,15 mgkg ⁻¹ de Hg (peso seco). El pH afectó la eliminación de Pb y Hg por RB, y el medio eluyente alcalino fue favorable para su eliminación.
Shah V. y Daverey A., 2021	Evalúa los efectos de la enmienda de <i>soforolípidos</i> (SL) en suelos contaminados con metales pesados sobre el crecimiento de <i>Medicago sativa</i> y <i>Bidens pilosa</i> , y la eficiencia de absorción de metales y la respuesta al estrés metálico en <i>B. pilosa</i>	<p>-Todas las muestras de suelo se tomaron de 0 a 20 cm de profundidad y se transportaron al laboratorio</p> <p>-Se secó al aire a temperatura ambiente, se molió con un mortero 125 y se tamizó con un tamiz de 2 mm antes de utilizarlo para los experimentos en macetas y el análisis (físico-químico y de metales pesados).</p>	El aumento en la altura de las plantas fue del 17% y 11% para <i>M. sativa</i> y <i>B. pilosa</i> , respectivamente, después de 60 d de experimento. En otro experimento (40 d), la presencia de Cd en el suelo (29,2 mg kg ⁻¹) afectaron negativamente a la fitobiomasa de <i>B. pilosa</i> .
Santana Flores A. et al., 2020	Analizar el potencial del biosurfactante a base de bacterias en un suelo contaminado con metales pesados.	Se aisló 141 cepas de agua, lixiviados, suelo y rizosfera y tallos de plantas de relaves de mina. La tolerancia bacteriana se determinó por la concentración mínima inhibitoria en diferentes sales	Los resultados de las 141 cepas analizadas mostraron tolerancia ascendente a Cd ²⁺ 2 mM, Cu ²⁺ 5 mM, Pb ²⁺ 9 mM, Zn ²⁺ 9 mM, Ag ²⁺ 10 mM, As ³⁺ 30 mM y As ⁵⁺ 45 mM. Solo 9.24 y 39% de las cepas

		metálicas, la capacidad de bioacumulación de Ag, Pb, Cr y Cd, y por la biotransformación de As (III) y Cr6 +; además, se identificaron bacterias representativas utilizando secuencias de genes de ARNr.	bioacumularon Zn ²⁺ , Pb ²⁺ y Ag ²⁺ . En la biotransformación solo 9% oxidaron As ³⁺ a As ⁵⁺ , 7 y 24% redujeron As ⁵⁺ a As ³⁺ y Cr ⁶⁺ a Cr ³⁺ , respectivamente.
Noyola José Luis A. et al., 2021	Se determinó la producción de biosurfactantes con base en la hemolisis agar sangre, halos azules en agar CTAB-azul de metileno, ensayo de colapso de gotas, producción de espuma en medio PPGAS, índice de emulsión (IE24) y capacidad antibacterial.	Se determinó la producción de biosurfactantes con base en la hemolisis agar sangre, halos azules en agar CTAB-azul de metileno, ensayo de colapso de gotas, producción de espuma en medio PPGAS, índice de emulsión (IE24) y capacidad antibacterial, las cepas se identificaron por la secuencia del gen del 16S y también se evaluó la resistencia a metales pesados.	Dos cepas aisladas de la rizosfera de Zea mays(PAM8, PAM9) fueron las mejores productoras de biosurfactantes, todas las cepas mostraba el mismo perfil de tolerancia a metales pesados (As 5+ > As 3+ > Zn 2+ > Pb 2+ > Fe 3+ > Cd 2+ > Cu 2+ > Cr 6+ en concentraciones de 20, 10, 10, 6, 4, 4, 2 y 2 mM., Respectivamente).
Selva Filho a. et al., 2021	se investigaron las propiedades tensioactivas del extracto vegetal. La concentración micelar crítica (CMC) del extracto fue 1,4 ± 0,1 g / L y la tensión superficial en este punto fue 25,84 ± 0,7 mN / m.	No indica	El biosurfactante emulsionó el 65% del aceite de motor y eliminó el 40% de los metales pesados.
Ravindran Amrudha et al., 2020	Una bacteria marina asociada a la esponja (MSI 54) fue identificada como productora de biosurfactantes que mostró una alta emulsificación y propiedades reductoras de la tensión superficial.	El aislado se inoculó en un medio de producción optimizado mantenido a un pH de 7,0 y se incubó a 28 ° C en una incubadora con agitador (Orbitek) durante 5 días. Para extraer el biotensioactivo, las células bacterianas se separaron por centrifugación y el filtrado se acidificó a pH 2,0 usando HCl 2 N y se mantuvo a 4°C durante la noche. El precipitado obtenido se lavó con agua estéril hasta alcanzar el pH de 7,0.	La eficacia de remediación de metales pesados del biosurfactante a una concentración micelar crítica (CMC) de 2,0 x mostró una eliminación de 75. 5% de Hg, 97,73% de Pb, 89,5% de Mn y 99,93% de Cd, respectivamente, en 1.000 ppm de la solución metálica respectiva.

Da Rocha J. et al., 2019	Se describe la producción de un biosurfactante por la levadura <i>Candida tropicalis</i> cultivado en agua destilada con 2,5% de melaza, 2,5% de aceite para freír y 4% de licor de maceración de maíz.	No indica	Las pruebas en columnas empaquetadas también confirmaron la capacidad del biosurfactante para eliminar Cu y Zn a tasas que oscilan entre el 45 y el 65%. Sin embargo, el plomo no se eliminó en condiciones estáticas.
Md Badrul H. et al., 2019	Determinar el potencial de <i>Bacillus</i> sp. Para eliminar metales pesados del suelo	-7 días de cultivo en medio de sal mineral y 2% (v / v) de UCO a una temperatura de 30 ° C y con agitación a 200 rpm.	<i>Bacillus</i> sp. HIP3 es un aislado Gram-positivo que dio el mayor área de desplazamiento de aceite con la menor tensión superficial, de 38 mN / m, después de 7 días de cultivo en medio de sal mineral y 2% (v / v) de UCO a una temperatura de 30 ° C y con agitación a 200 rpm.
Ayangbenro A. et al., 2020	<i>Bacillus cereus</i> NWUAB01 se aisló de un suelo minero y se determinó su resistencia a metales pesados en agar Luria-Bertani.	<i>Bacillus cereus</i> se aisló de un suelo minero y se determinó su resistencia a metales pesados en agar Luria-Bertani. La producción de biosurfactante se determinó mediante métodos de cribado como el colapso de las gotas, la emulsificación y la medición de la tensión superficial. El biosurfactante producido se evaluó para la remoción de metales (100 mg / L de cada metal) del suelo contaminado.	El biosurfactante tenía una tensión superficial de 39,5 mN / m con una eficiencia de eliminación de metal del 69%, 54% y 43% para Pb, Cd y Cr respectivamente.
Muthusamy y Go. Et al., 2017	El objetivo del estudio fue aislar bacterias resistentes a metales pesados del suelo subterráneo contaminado con cromo e investigar la producción de biosurfactantes y la biorremediación de metales pesados.	Con base en la secuencia del gen 16S rRNA y el análisis filogenético, el aislado se identificó como <i>Rahnella</i> sp. RM. La producción de biosurfactantes por <i>Rahnella</i> resistente a metales pesados sp. La RM se optimizó mediante el diseño de Box-Behnken (BBD).	La actividad de emulsificación máxima se obtuvo 66% a 6% de harina de soja en pH 7.0 y 33.5 ° C.

Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este trabajo es una investigación cualitativa, ya que, el objetivo de la investigación cualitativa es comprender la realidad social de los individuos, grupos y culturas lo más cerca posible de cómo la sienten o la viven sus participantes. Así, se estudian personas y grupos en su entorno natural.

Además, el tipo de investigación es aplicada, ya que, la investigación aplicada busca resolver el planteamiento de un problema específico mediante el enriquecimiento de estudios previos para su posterior aplicación (Ceroni Galloso M., 2010, p.4). De acuerdo con Veland, Siri, et al., (2018, p.14) la investigación aplicada cuantifica la eficacia de la aplicación del conocimiento científico en un problema, buscando ampliar conocimientos, aprovechando las pruebas controladas que intentan capturar el comportamiento del mundo real para determinar cómo se comporta el sistema aplicado.

Mientras que, el diseño es de narrativo de tópico, ya que se va hacer uso de las experiencias vividas por los investigadores mediante la temática narrativa, es decir, se va estudiar las metodologías, las variaciones que tuvieron los investigadores cuando se aplicó los biosurfactantes producido por *Bacillus* para la remediación de suelos contaminados con metales pesados; tomando en cuenta la experiencia de los autores como un fenómeno al cual se le va a estudiar.

Así también, Salgado A., (2007, p.73) señala que las investigaciones narrativas de tópicos son centradas en un suceso o fenómeno en cual se va a aplicar la recolección de información y datos de un tema en específico; siendo los datos de la información artículos científicos.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Las categorías y subcategorías fueron propuestas en base a los objetivos y problemas específicos; buscando generar una lista de atributos para tener unos resultados precisos (Ver tabla 3).

Tabla 3. Matriz de categorización apriorística

PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CATEGORÍAS	SUB CATEGORÍAS	CRITERIO 1	CRITERIO 2
¿Cuál es el grupo de <i>Bacillus</i> más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados?	Determinar el grupo de <i>Bacillus</i> más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados.	<i>Bacillus</i> más empleados para la producción de biosurfactantes (Liu Guansheng et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas sp.</i> • <i>Bacillus sp.</i> • <i>Citrobacter freundii</i> • <i>Candida</i> (Akbari Sweeta et al., 2018, p.3).	De acuerdo con la cantidad de veces empleado	De acuerdo con el porcentaje de remoción
¿Cuáles son las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados?	Analizar las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados.	Características fisicoquímicas del suelo contaminado (Araújo Larissa et al., 2021, p.1)	<ul style="list-style-type: none"> • Actividad deshidrogenasa del suelo • Capacidad de retención de agua • Carbono orgánico • pH (Nour Hamdy E. et al., 2019, p.1)	De acuerdo con el tiempo de contaminación del suelo	De acuerdo con la cantidad de contaminante presente en el suelo
¿Cuáles son los biosurfactantes producidos por <i>Bacillus</i> con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo?	Identificar los biosurfactantes producidos por <i>Bacillus</i> con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo.	Grupo de bacteria con mayor porcentaje de remoción (Zeng Ling et al., 2021, p.1)	<ul style="list-style-type: none"> • Gram - positivas • Gram - negativas (Shen Feng et al., 2017, p.1).	De acuerdo con el porcentaje de remoción	De acuerdo con el tiempo de remoción del metal en el suelo

Fuente: Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

El trabajo de investigación toma en cuenta como escenario de estudio a los lugares donde los autores iniciaron y realizaron sus estudios (campo o laboratorio), y que es de interés en el presente estudio; siendo estos escenarios encontrados en los diversos artículos científicos extraídos a nivel nacional e internacional.

3.4. Participantes

Los participantes son todas las fuentes que permitieron brindar los artículos científicos, artículos que nos brindaron la información necesaria para resolver nuestro objetivo planteado, siendo estas fuentes: scielo, sciencedirect, scopus.

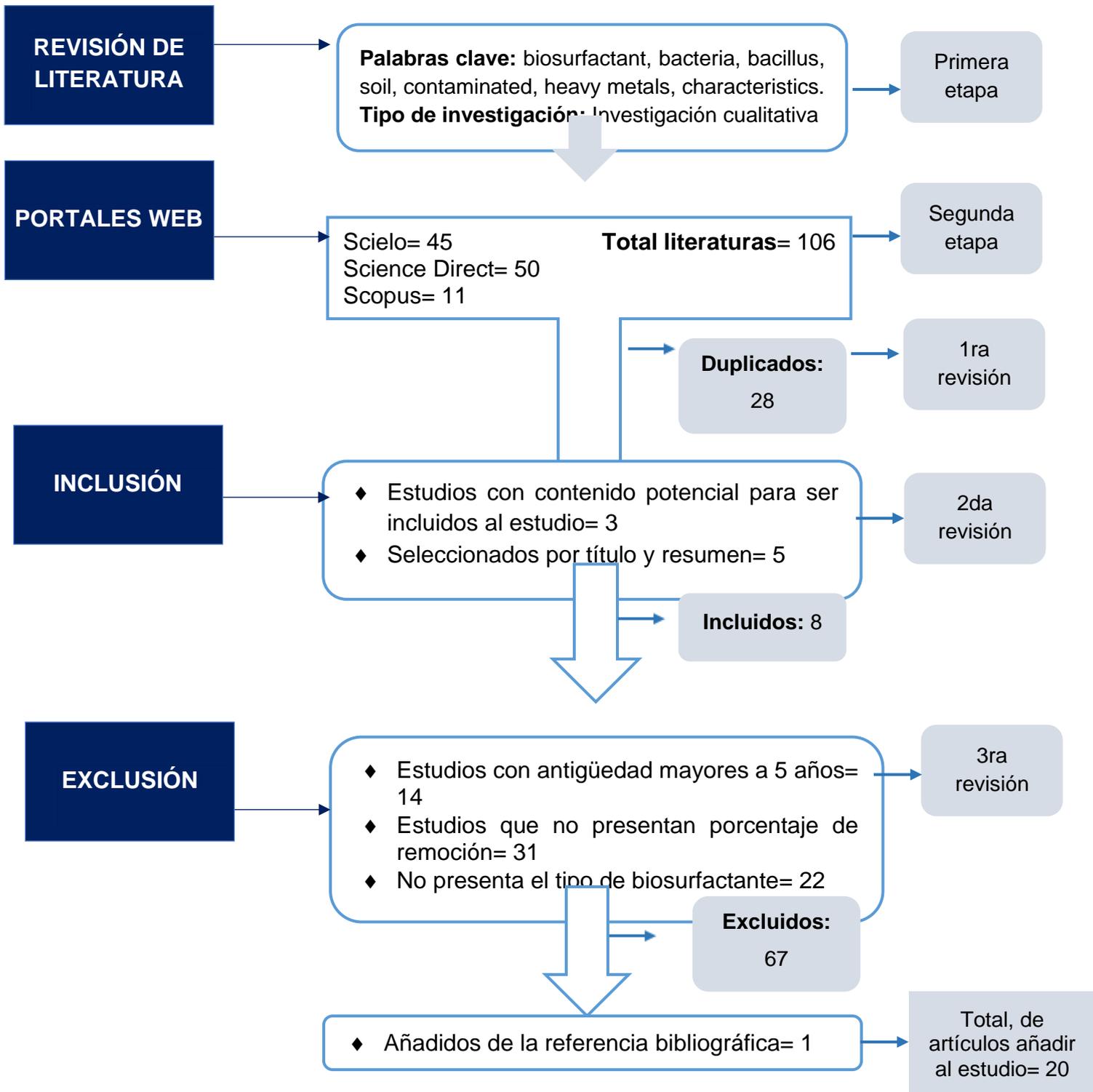
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El tipo de técnica empleada en este estudio es el análisis documental; ya que se va a analizar estudios recolectados acerca de los biosurfactantes y analizar la remediación de su aplicación en suelos contaminados con metales pesados. El análisis documental tiene una metodología perfectamente establecida, y sus diversas etapas, sus definiciones y concreciones, deben estar perfectamente definidas; ello es especialmente relevante al enfocar cualitativamente la herramienta con la finalidad de limitar su potencial subjetividad (Hernández et al., 2014, p. 415).

Así también, se utilizó una ficha como instrumento de recolección de datos; denominada ficha de análisis de contenido (Ver anexo 1). Para codificar y tener una búsqueda más sintetizada de los documentos se emplea la ficha de análisis; ya que, esta ficha sirve para codificar los datos de un estudio para brindar un análisis de contenido (Orellana y Sánchez, 2006, p. 207). La ficha elaborada presenta datos de contenido como: Datos del autor (nombres, año, página), título de investigación, objetivos, metodología, resultados y conclusión.

3.6. Procedimientos

Gráfico 1. Procedimiento de selección de artículos



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

Los rigores científicos con los que se siguieron para presentar un estudio calidad fueron: dependencia, confirmabilidad, transferencia y credibilidad. De acuerdo con (Guba y Lincoln, 1989, pp. 241-243); se describe lo siguiente:

De acuerdo con Guba y Lincoln (1989, p.241) un sistema de votación es consistente sí, siempre que el electorado se divide (arbitrariamente) en varias partes y las elecciones en esas partes obtienen el mismo resultado, entonces una elección de todo el electorado también obtiene ese resultado. Smith llama a esta propiedad separabilidad y Woodall la llama convexidad. Y este criterio de consistencia o dependencia se emplea en la búsqueda de datos similares o iguales en las diversas investigaciones que emplean biosurfactantes como medio de remediación.

La credibilidad hace referencia a que tan bien el investigador ha recibido la información brindada por el autor original, y ello se en la capacidad de transmitir o comunicar el punto de vista del participante. Esto es aplicado en la información extraída y plasmada de manera objetiva para evitar subjetividad de los datos proporcionados.

La transferibilidad se refiere al grado en que los resultados de la investigación cualitativa pueden generalizarse o transferirse a otros contextos o entornos. Y esto se aplica con el contenido que se realizará y que será opto para ser utilizado por otros investigadores y aplicado en otros contextos.

La confirmabilidad es la objetividad con la que se utilizan los datos de un estudio; y así otros autores pueden buscar analizar la información y tener la certeza de la veracidad de la información. Esto se obtiene en la utilización de los procedimientos y técnicas empleadas que su utilizaron y que van a poder hacer uso los futuros investigadores o cualquier otro y continuar con el estudio.

3.8. Método de análisis de información

El método de análisis del presente estudio es la triangulación; ya que nos permite hacer uso de diversos métodos; siendo uno de ellos la matriz apriorística; de la elaboración de la matriz se crearon 3 categorías con sus respectivas subcategorías; lo que hará que los resultados sean más ordenados y concisos con respecto a el objetivo general del estudio.

Categorías: Bacillus más empleados para la producción de biosurfactantes, Características fisicoquímicas del suelo contaminado, Metales pesados con mayor porcentaje de remoción

Subcategorías:

- *Pseudomonas sp.*
- *Bacillus sp.*
- *Citrobacter freundii*
- *Candida*

- pH
- Actividad deshidrogenasa del suelo
- Capacidad de retención de agua
- Carbono orgánico

- Gram - Positivas
- Gram - Negativas

3.9. Aspectos éticos

El presente estudio aplicó la normativa vigente establecida por la universidad Cesar Vallejo Filial Lima-Este según la resolución rectoral N° 0089-2019. Así como el uso del correcto citado de los artículos de investigación utilizados, empleando la Normativa ISO 690 y 690-2; con ello se hizo cumplir los rigores de calidad preestablecidos por la universidad.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los compuestos biológicos tensioactivos también conocidos como biosurfactantes en general y biosurfactantes de ramnolípidos en particular se han empleado con éxito en la remediación de entornos contaminados con iones de metales pesados (Sarubbo L. et al., 2016, p.1). Debido a ello, se busca determinar el grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados; presentando los resultados en la tabla N°4.

Tabla 4. *Bacillus* más utilizados para remediar suelos con iones metálicos

Autor	Tipo de <i>Bacillus</i> empleado	Resultado
Sun Wuyang et al., 2021	<i>Bacillus anthracis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus sphaericus</i> y <i>Bacillus subtilis</i> para / Gram positivas	Las eficiencias de remoción del 78.7, 65.7 y 56.9% para Cd, Cu y Pb respectivamente se lograron en condiciones optimizadas de biolixiviación (pH: 11, relación suelo / solución: 30: 1 y suelo no esterilizado), pruebas comparativas entre surfactantes químicos comunes (SDS, Tween-80) y los biosurfactantes demostraron la mayor capacidad de eliminación.
Yang Zhihui et al., 2018	biosurfactantes brutos de <i>Burkholderia Burkholderia sp.</i> / Gram negativas	Las eficiencias óptimas de eliminación de Zn, Pb, Mn, Cd, Cu y As por <i>Burkholderia sp.</i> Los lixiviados Z-90 fueron 44.0, 32.5, 52.2, 37.7, 24.1 y 31.6%, respectivamente. pH= 7, 10
Mekwichai Pannawee et al., 2020	Ramnolípidos (RL) y saponina (SP)	Las eficiencias de eliminación de Cd el día 80 fueron del orden de SP (18,80%)> RL (11,33%)> control (4,59%). pH= 7.02
Tang Jian et al., 2020	Rhamnolípidos, saponinas y sophorolípidos / Gram negativas	La distribución de metales pesados demostró que 58.63%, 71.34%, 63.04%, 52.95%, 61.74%, 56.24% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso migraron a la solución del electrodo, respectivamente, y 38.02%, 26.20%, 32.54 %, 42.69%, 36,34%, 42,35% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso permanecieron en el lodo. pH= 7.21
Li Qiqi Z. et al., 2020	Saponina	Las eficiencias de recuperación de La, Dy, Er, Cd y Pb alcanzaron 96,9%, 88%, 84,3%, 88% y 91,1% utilizando 0,3 g / g (Ca (OH) 2/tierra). Las eficiencias generales de extracción de La, Dy, Er, Cd y

		Pb fueron 53,9%, 73,2%, 71,7%, 95,9% y 38,8% tres veces usando la solución de TS recuperada. pH= 5
Yang Zhihui et al., 2016	Aislar una cepa productora de biosurfactantes <i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	La eficiencia de remoción fue 44.0% para Zn, 32.5% para Pb, 52.2% para Mn, 37.7% para Cd, 24.1% para Cu y 31.6% para As, respectivamente. Mn, Zn y Cd se eliminaron más fácilmente del suelo que Cu, Pb y As, lo que se atribuyó a la presencia de una alta fracción soluble en ácido de Mn, Zn y Cd y una alta fracción residual de Cu, Pb y As. pH=6
Guo Yi-ming et al., 2017	<i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	El resultado mostró que la especiación intercambiable de Pb podría eliminarse mediante una capacidad máxima de eliminación de 76,8 mg / g después de la lixiviación. pH= No indica
Chen Qingguo et al., 2021	<i>pseudomonas aeruginosa</i> / Gram-negativas	Los resultados mostraron que el Pb y el Hg podrían eliminarse de manera eficiente del sedimento intermareal en el medio marino mediante el uso de RB producido por unas <i>pseudomonas aeruginosa</i> .kg ⁻¹ de Pb y 13,15 mgkg ⁻¹ de Hg (peso seco). pH= 7
Shah V. y Daverey A., 2021	<i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	El aumento en la altura de las plantas fue del 17% y 11% para M. sativa y B. pilosa, respectivamente, después de 60 d de experimento. En otro experimento (40 d), la presencia de Cd en el suelo (29,2 mg kg ⁻¹) afectaron negativamente a la fitobiomasa de B. pilosa. pH= N indica
Santana Flores A. et al., 2020	<i>Chryseobacterium</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Serratia</i> sp. Y <i>Enterobacter</i> sp / Gram-negativas	Los resultados de las 141 cepas analizadas mostraron tolerancia ascendente a Cd ²⁺ 2 mM, Cu ²⁺ 5 mM, Pb ²⁺ 9 mM, Zn ²⁺ 9 mM, Ag ²⁺ 10 mM, As ³⁺ 30 mM y As ⁵⁺ 45 mM. Solo 9.24 y 39% de las cepas bioacumularon Zn ²⁺ , Pb ²⁺ y Ag ²⁺ . En la biotransformación solo 9% oxidaron As ³⁺ a As ⁵⁺ , 7 y 24% redujeron As ⁵⁺ a As ³⁺ y Cr ⁶⁺ a Cr ³⁺ , respectivamente. pH= No indica
Noyola José Luis A. et al., 2021	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> / Gram-negativas	Dos cepas aisladas de la rizosfera de Zea mays(PAM8, PAM9) fueron las mejores productoras de biosurfactantes, todas las cepas mostraba el mismo perfil de

		tolerancia a metales pesados (As 5+ > As 3+ > Zn 2+ > Pb 2+ > Fe 3+ > Cd 2+ > Cu 2+ > Cr 6+ en concentraciones de 20, 10, 10, 6, 4, 4, 2 y 2 mM., Respectivamente). pH= 6
Selva Filho a. et al., 2021	<i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	La remoción de metales pesados alcanzó tasas de alrededor del 40,00 ± 2,6%. El surfactante de origen vegetal demostró claramente su viabilidad en cuanto a su uso como aditivo biotecnológico para procesos de remediación ambiental. pH= 2.5
Ravindran Amrudha et al., 2020	<i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	La eficacia de remediación de metales pesados del biosurfactante a una concentración micelar crítica (CMC) de 2,0 x mostró una eliminación de 75. 5% de Hg, 97,73% de Pb, 89,5% de Mn y 99,93% de Cd, respectivamente, en 1.000 ppm de la solución metálica respectiva. pH= 7
Da Rocha J. et al., 2019	<i>Candida tropicalis</i>	La capacidad del biosurfactante para eliminar Cu y Zn a tasas que oscilan entre el 45 y el 65%. Sin embargo, el plomo no se eliminó en condiciones estáticas. pH= 10
Md Badrul H. et al., 2019	<i>Bacillus subtilis</i> / Gram positiva	El biosurfactante fue capaz de eliminar 13,57%, 12,71%, 2,91%, 1,68% y 0,7% de cobre, plomo, zinc, cromo y cadmio, respectivamente. pH= 9
Ayangbenro A. et al., 2020	<i>Bacillus cereus</i> / Gram positiva	El biosurfactante presentaron una eficiencia de eliminación de metal del 69%, 54% y 43% para Pb, Cd y Cr respectivamente. pH= No indica
Muthusamy Go. Et al., 2017	<i>Rahnella sp.</i> / Gram-negativas	Las tasas más altas de remoción de metal usando el biosurfactante se encontraron 74,3, 72,5 y 70,1%, respectivamente en 48 horas. pH= 7
Sriram Muthu I. et al., 2011	<i>Bacillus cereus</i> / Gram positiva	La resistencia a metales pesados mostró que el aislado era resistente a ferrosos, plomo y zinc en un 76%, 80% y 69%. pH= 7.1
Kumari Moni et al., 2020	<i>Pseudomonassp.</i> / Gram positiva	<i>Pseudomonas sp.</i> puede degradar hasta el 97% de contaminantes que se encuentran en el suelo. pH=7.5
Martins Paola C. et al., 2018	<i>Corynebacterium aquaticum spp.</i> / Gram positiva	La capacidad de eliminación de HM fue de 87,6 y 61,6%. pH= 7

Elaboración propia

De acuerdo con la comparación de 20 literaturas se tiene que la bacteria más empleada por los autores es el *Bacillus subtilis*, siendo ello corroborado por el 67% de los autores. Siendo ello corroborado por: Sun Wuyang et al., 2021, Yang Zhihui et al., 2016, Guo Yi-ming et al., 2017, Shah V. y Daverey A., 2021, Santana Flores A. et al., 2020, Selva Filho a. et al., 2021, Ravindran Amrudha et al., 2020, Md Badrul H. et al., 2019.

Ello debido a que este tipo de bacteria es considerada como un potencial prometedor debido a sus características morfológicas, bioquímicas y moleculares (Yang Zhihui et al., 2016).

Guo Yi-ming et al., 2017 encontró que la cepa *Bacillus subtilis* exhibía capacidad de producción de biosurfactante con alto índice de emulsificación (83,1%) y actividad de reducción de la tensión superficial (83,8 a $21,9 \pm 0,21$). Esto es apoyado por Kumar Amrit et al., (2021, p.1) quien afirma que el extracto crudo de la cepa AKP también provocó una reducción significativa en la incidencia de la enfermedad (síntomas de antracnosis) en un $16.66 \pm 0.23\%$, lo que proporcionó una buena eficiencia de control biológico contra *C. capsici* basado en un ensayo de fruta desprendida in vitro. *B. subtilis* AKP mostró la presencia de surfactina (srfAA), iturina (ituC) y fengycin (fenD) genes biosintéticos antimicrobianos en el ensayo de PCR y el análisis LC-MS identificó diferentes homólogos de surfactina, iturina y biosurfactante lipopéptido fengycin de la fracción metanólica.

Esto es también respaldado por Shah V. y Daverey A., 2021 afirmando que la cepa *Bacillus subtilis* muestra potencial para la promoción del crecimiento de las plantas tanto en ensayos in vitro como en condiciones in vivo en experimentos en macetas.

De acuerdo con el planteamiento del segundo objetivo de acuerdo al análisis de las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados se tiene lo siguiente:

Tabla 5. Efecto del pH del suelo en la absorción de metales pesados

Rangos de pH	Condición del suelo	Referencias y/o fuentes de información
1 – 5,5	Ácidas	Li Qiqi Z. et al., 2020, Selva Filho a. et al., 2021
5,5 – 8	Ideales	Yang Zhihui et al., 2018, Mekwichai Pannawee et al., 2020, Tang Jian et al., 2020, Yang Zhihui et al., 2016, Chen Qingguo et al., 2021, Noyola José Luis A. et

		al., 2021, Ravindran Amrudha et al., 2020, Muthusamy Go. Et al., 2017, Sriram Muthu I. et al., 2011, Kumari Moni et al., 2020, Martins Paola C. et al., 2018
8 - 14	Alcalinas	Sun Wuyang et al., 2021, Da Rocha J. et al., 2019, Md Badrul H. et al., 2019

Elaboración propia

La influencia de la aplicación de biosurfactantes producido por *Bacillus* en la remediación de suelos contaminados con metales pesados se evaluó bajo varios pH del suelo, donde el pH del suelo se dividió en tres grupos: de 1 a 5,5, de 5,5 a 8 y de 8 a 14 para condiciones ácidas, ideales y alcalinas del suelo, respectivamente.

Los resultados muestran que cada metal pesado tiene un comportamiento específico con respecto a su extracción bajo varios pH; encontrando el 78% de los autores en un pH ideal, la mayor adsorción.

Estos resultados son corroborados con Zakari Sissou et al., (2021, p.6) donde las extracciones de cadmio (RR = - 0,725, $p < 0,001$) y zinc (RR = - 0,762, $p < 0,001$) fueron menores en los tratamientos con azufre en comparación con los tratamientos sin azufre en condiciones de pH ácido, mientras que no se observaron diferencia para la extracción de zinc (RR = 0,093, $p = 0,512$) entre los tratamientos con azufre y sin azufre bajo un pH ideal. Esto es también corroborado por Sun Wuyang et al., 2021 quien apoya la afirmación anterior señalando que las eficiencias de remoción del 78.7, 65.7 y 56.9% para Cd, Cu y Pb respectivamente se lograron en condiciones optimizadas de biolixiviación con un pH alcalino (pH:11), además pruebas comparativas entre surfactantes químicos comunes (SDS, Tween-80) y los biosurfactantes producido por bacterias demostraron la mayor capacidad de eliminación para el segundo caso.

Para también Li Qiqi Z. et al., 2020 los resultados experimentales mostraron que los parámetros óptimos de extracción fueron el consumo de 1.2 g / g (TS / suelo), el pH de 5 y el tiempo de extracción de 24 h. Las eficiencias de recuperación de La, Dy, Er, Cd y Pb alcanzaron 96,9%, 88%, 84,3%, 88% y 91,1% utilizando 0,3 g / g (Ca (OH) 2/tierra). Siendo esta afirmación respaldada por Li Qiqi Z. et al., 2020 Los resultados experimentales mostraron que los parámetros óptimos de extracción fueron el consumo de 1.2 g / g (TS / suelo), el pH de 5 y el tiempo de extracción de 24 h.

Así también, se demuestra de acuerdo a los resultados obtenidos por Patowary Rupshikha et al., (2018, p.2) que algunas propiedades físico-químicas del antes y después del suelo mediante la biorremediación con biosurfactantes (Ver tabla N°6), donde, al final del proceso de biorremediación, el carbono orgánico total (COT) del suelo disminuyó del valor inicial de 3.75% a 3.05%, 2.51%, 2.26%, 2.10% y 1.98%, respectivamente cuando se aplicó 0.1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% y 0,5% (p / p) de biosurfactante en la biorremediación; concluyendo que la razón de la disminución del TOC fue la degradación de los compuestos de carbono por la flora microbiana en el suelo.

Tabla 6. Propiedades físico-químicas del suelo antes y después de la biorremediación

Parámetros físico-químicos	Antes de la biorremediación	Tras la biorremediación con diferentes concentraciones de biosurfactante					
		Sin biosurfactantes	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
TOC (%)	3.75	3.42	3.05	2.51	2.26	2.10	1.98
WHC (%)	33.8	37.3	41.5	48.4	55.2	61.6	66.4

Así también, con la aplicación de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5% (p / p) del biosurfactante, la capacidad de retención de agua (WHC) del suelo aumento del valor inicial de 33.8% a 41.5%, 48.4%, 55,2%, 61,6% y 66,4%, respectivamente, después de 90 días. En comparación con la biorremediación del suelo con biosurfactantes, en el suelo control, la reducción de TOC (de 3,75% a 3,42%) y el aumento de WHC (de 33,8% a 37,3%) fueron pobres.

Además, la actividad deshidrogenasa del suelo (DH) es uno de los principales indicadores para evaluar la actividad biológica del suelo (Zhu Xiaomin et al., (2017, p.4). De acuerdo con el estudio de Guo Junyuan et al., (2020, p.4), la remediación microbiana promueve la actividad DH y el efecto estimulante también se produce después de la aplicación de los biosurfactantes, lo que indica que el biosurfactante facilita las actividades microbianas. Esta afirmación también es corroborada por Wolf D. y Gan J., (2018, p.5) quien en ausencia del biosurfactante, la actividad DH del

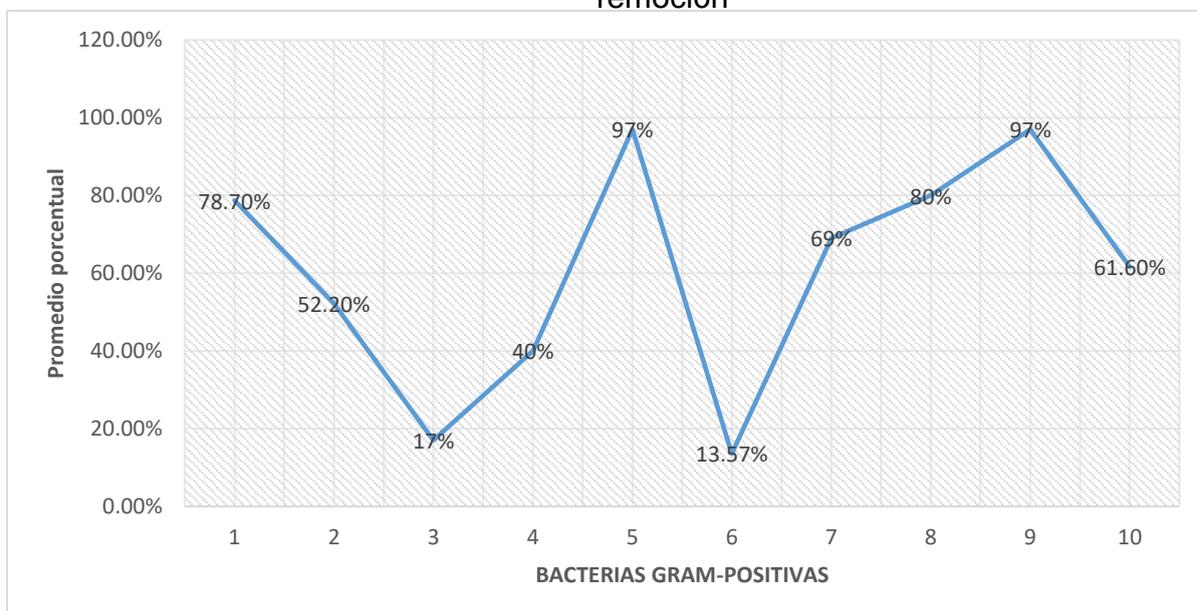
suelo de remediación microbiana aumento del valor inicial del 29,3% al 32,5%, aumentando en un 10,9% al 29,3%.

Cao Yanan et al., (2016, p.5) señala que el biosurfactante afecta principalmente la actividad enzimática al cambiar las propiedades fisicoquímicas del suelo y liberar algunas moléculas pequeñas que se consideran como reguladores alostéricos o inhibidores de enzimas específicas.

Apoyando lo anteriormente dicho está Guo J. y Wen Xiaoying et al., (2021, p.8) quien señala que los datos de TOC, WHC y DH presentan una relación lineal, donde la disminución significativa de TOC y el aumento de WHC y DH implican el papel positivo del biosurfactante producido por *Bacillus* en la biorremediación del suelo; por lo tanto, el uso de biosurfactantes en la biorremediación del suelo puede mejorar la calidad del suelo y reducir la proporción de metales pesados en el suelo.

De acuerdo al planteamiento del tercer objetivo se identifica los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo; presentando los resultados en el gráfico 2 y 3.

Gráfico 2. Biosurfactantes a base de bacteria Gram - positivas y su porcentaje de remoción



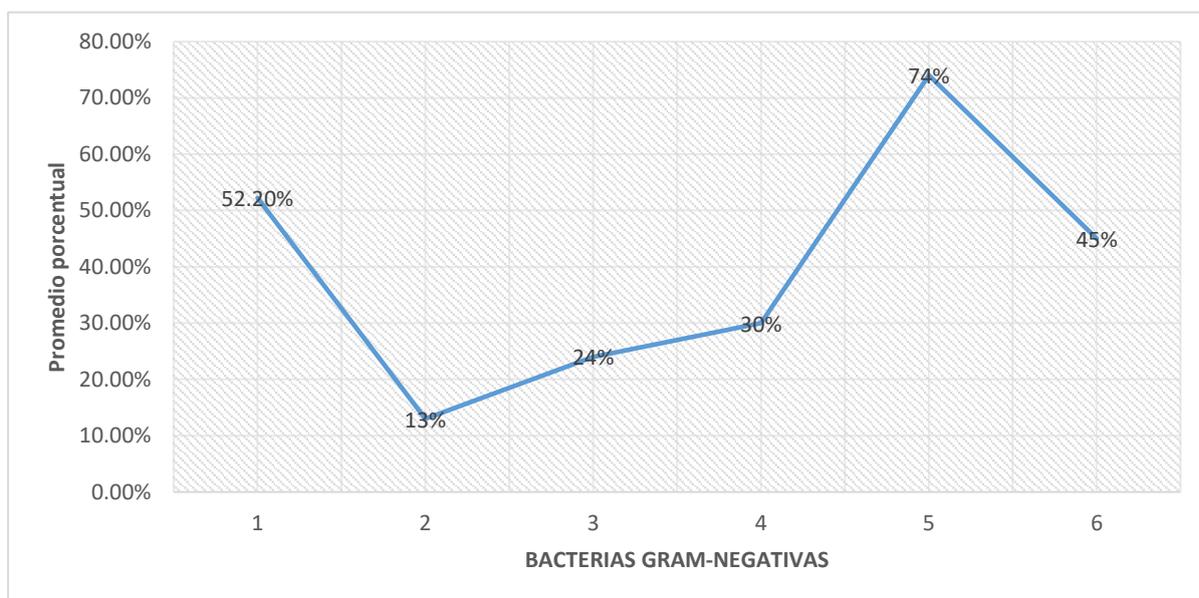
Elaboración propia

De acuerdo a la comparación de 20 literaturas y al promedio representado en el gráfico 2 respecto a la tabla 4 se tiene que los biosurfactantes producidos por

bacterias Gram positivas representan un porcentaje de remoción de metales pesados del suelo que varía entre un 50 a 80%, siendo ello corroborado por: Sun Wuyang et al., 2021, Yang Zhihui et al., 2016, Guo Yi-ming et al., 2017, Shah V. y Daverey A., 2021, Selva Filho a. et al., 2021, Ravindran Amrudha et al., 2020, Md Badrul H. et al., 2019, Ayangbenro A. et al., 2020, Sriram Muthu I. et al., 2011, Kumari Moni et al., 2020 y Martins Paola C. et al., 2018.

De igual manera se determinó el porcentaje de remoción de los biosurfactantes elaborados por bacterias Gram negativas, donde el promedio en el gráfico 3 demuestra que el porcentaje de remoción se encuentra entre un 20 a 50%.

Gráfico 3. Biosurfactantes a base de bacteria Gram - negativas y su porcentaje de remoción



Elaboración propia

Los resultados obtenidos son corroborados por los siguientes autores: Yang Zhihui et al., 2018, Chen Qingguo et al., 2021, Santana Flores A. et al., 2020, Noyola José Luis A. et al., 2021 y Tang Jian et al., 2020.

Se obtiene que los biosurfactantes producidos a base de bacterias Gram positivas presentan un mayor porcentaje de remoción de metales pesados del suelo. Así también lo indica Sun Wuyang et al., 2021, donde las eficiencias de remoción del 78.7, 65.7 y 56.9% para Cd, Cu y Pb respectivamente se lograron en condiciones optimizadas de biolixiviación (pH: 11, relación suelo / solución: 30: 1 y suelo no

esterilizado), pruebas comparativas entre surfactantes químicos comunes (SDS, Tween-80) y los biosurfactantes demostraron la mayor capacidad de eliminación a través de las bacterias Gram negativas *Bacillus anthracis* , *Bacillus cereus*, *Bacillus sphaericus* y *Bacillus subtilis*.

Apoyando lo anteriormente dicho también se encuentra Selva Filho a. et al., 2021 quien usó la bacteria Gram positiva *Bacillus subtilis* y la remoción de metales pesados alcanzó tasas de alrededor del $40,00 \pm 2,6\%$. El surfactante de origen vegetal demostró claramente su viabilidad en cuanto a su uso como aditivo biotecnológico para procesos de remediación ambiental.

Siendo esta afirmación rechazada por Tang Jian et al., 2020 demostró que 58.63%, 71.34%, 63.04%, 52.95%, 61.74%, 56.24% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso migraron a la solución del electrodo, respectivamente, y 38.02%, 26.20%, 32.54 %, 42,69%, 36,34%, 42,35% de cobre, zinc, cromo, plomo, níquel y manganeso permanecieron en el lodo. Al igual que Muthusamy Go. Et al., 2017 con la bacteria Gram negativa *Rahnella sp* obtuvo las tasas más altas de remoción de metal usando el biosurfactante se encontraron 74,3, 72,5 y 70,1%, respectivamente en 48 horas.

V. CONCLUSIONES

- El grupo de *Bacillus* más empleados para la producción de biosurfactantes en la remediación de suelos contaminados con metales pesados son cepas bacterianas Gram positivas, representado por el 67% de los investigadores, donde la bacteria *Bacillus subtilis* es el más empleado para la elaboración de biosurfactantes, ello debido a que este tipo de bacteria es considerada como un potencial prometedor debido a sus características morfológicas, bioquímicas y moleculares.
- Las características fisicoquímicas del suelo contaminado con metales pesados son el pH, la capacidad de retención de agua, la actividad deshidrogenasa del suelo y el carbono orgánico total, debido a que el biosurfactante afecta principalmente la actividad enzimática al cambiar las propiedades fisicoquímicas del suelo y liberar algunas moléculas pequeñas que se consideran como reguladores alostéricos o inhibidores de enzimas específicas y los parámetros TOC, WHC, DH y pH del suelo presentan una relación lineal donde la disminución o aumento implican el papel positivo del biosurfactante producido por *bacillus* en la biorremediación del suelo.
- Los biosurfactantes producidos por *Bacillus* con mayor porcentaje de remoción de metales pesados en el suelo son las cepas bacterianas Gram positivas presentando un mayor porcentaje de remoción de metales pesados del suelo en un 50 a 80%; mientras que el porcentaje de remoción de los biosurfactantes elaborados por bacterias Gram negativas varía en un 20 a 50%.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos se recomienda a los futuros investigadores lo siguiente:

- Realizar mayores investigaciones aplicando biosurfactantes producidos por cepas bacterianas, ya que al realizar a la revisión sistemática de diversas literaturas a nivel mundial se demostró los escasos de fuentes relacionados al tema propuesto.
- Se recomienda realizar estudios prácticos para evaluar cualitativamente el potencial de las bacterias Gram negativas, ya que, aunque fueron empleadas en menor cantidad existen algunas que también presentan resultados prometedores.
- Así también se recomienda emplear biosurfactante producido por bacterias marinas para determinar su actividad antimicrobiana.
- Se recomienda estudiar el efecto del biosurfactante producido por bacterias como estimulante en la biorremediación de otros contaminantes como los hidrocarburos aromáticos (HA).

REFERENCIAS

1. ABACHA, Yabalu; SANDERSON, Philip; RAHMAN, Pattanathu. Microbial process development for fermentation based biosurfactant production. En The Handbook of Microbial Bioresources. 2016.
2. AKBARI, Sweeta, et al. Biosurfactants—a new frontier for social and environmental safety: a mini review. *Biotechnology Research and Innovation*, 2018, vol. 2, no 1, p. 81-90. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biori.2018.09.001>
3. ALI, Amjad, et al. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China. *Scientific reports*, 2017, vol. 7, no 1, p. 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03045-9>
4. ALMANSOORY, Asia Fadhile, et al. Biosurfactant production by the hydrocarbon-degrading bacteria (HDB) *Serratia marcescens*: Optimization using central composite design (CCD). *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2017, vol. 47, p. 272-280. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.11.043>
5. ARAÚJO, Larissa SS; SILVA, Silvana Q.; TEIXEIRA, Mônica C. Developing a biosurfactant to attenuate arsenic contamination in mining tailings. *Heliyon*, 2021, vol. 7, no 2, p. e06093. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06093>
6. AYANGBENRO, Ayansina Segun; BABALOLA, Olubukola Oluranti. Genomic analysis of *Bacillus cereus* NWUAB01 and its heavy metal removal from polluted soil. *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no 1, p. 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75170-x>
7. BEATTIE, Rachelle E., et al. Variation in microbial community structure correlates with heavy-metal contamination in soils decades after mining ceased. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 126, p. 57-63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.011>

8. BORE, Ezekiel K., et al. Soil microorganisms can overcome respiration inhibition by coupling intra-and extracellular metabolism: ¹³C metabolic tracing reveals the mechanisms. *The ISME journal*, 2017, vol. 11, no 6, p. 1423-1433. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.3>
9. BRIFFA, Jessica; SINAGRA, Emmanuel; BLUNDELL, Renald. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no 9, p. e04691. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
10. Brunning, A. Una guía aproximada de las clasificaciones de carcinógenos de la IARC | Interés compuesto. 2019. Disponible en: <https://www.compoundchem.com/2015/10/26/carcinogens/>
11. CAO, Yanan, et al. Wheat straw biochar amendments on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in contaminated soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, vol. 130, p. 248-255. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.033>
12. CERONI GALLOSO, Mario. ¿Investigación básica, aplicada o sólo investigación? *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2010, vol. 76, no 1, p. 5-6. Disponible en: ISSN 1810-634X
13. CHEN, Qingguo, et al. Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 22, p. 101456. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101456>
14. CHUN, Seong-Jun, et al. Ecological network analysis reveals distinctive microbial modules associated with heavy metal contamination of abandoned mine soils in Korea. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 289, p. 117851. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117851>
15. COMERO, S., et al. Comparative study on open vessel digestion versus microwave-assisted digestion for the determination of trace and major elements in agricultural soils by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. *Talanta* (under review), 2016.

16. COSTA, Jorge AV, et al. Solid-state fermentation for the production of biosurfactants and their applications. En Current developments in biotechnology and bioengineering. Elsevier, 2018. p. 357-372. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00016-5>
17. CUI, Jian, et al. Effects of simulated Cd deposition on soil Cd availability, microbial response, and crop Cd uptake in the passivation-remediation process of Cd-contaminated purple soil. Science of The Total Environment, 2019, vol. 683, p. 782-792. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.292>
18. DA ROCHA JUNIOR, Rivaldo B., et al. Application of a low-cost biosurfactant in heavy metal remediation processes. Biodegradation, 2019, vol. 30, no 4, p. 215-233. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9833-1>
19. DE ALMEIDA, Darne G., et al. Biosurfactants: promising molecules for petroleum biotechnology advances. Frontiers in microbiology, 2016, vol. 7, p. 1718. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01718>
20. DE RIENZO, MA Diaz, et al. Effect of biosurfactants on Pseudomonas aeruginosa and Staphylococcus aureus biofilms in a BioFlux channel. Applied microbiology and biotechnology, 2016, vol. 100, no 13, p. 5773-5779. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7310-5>
21. FANG, Linchuan, et al. Proper land use for heavy metal-polluted soil based on enzyme activity analysis around a Pb-Zn mine in Feng County, China. Environmental Science and Pollution Research, 2017, vol. 24, no 36, p. 28152-28164. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0308-4>
22. FERNANDES, P. L., et al. Biosurfactant, solvents and polymer production by Bacillus subtilis RI4914 and their application for enhanced oil recovery. Fuel, 2016, vol. 180, p. 551-557. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.080>
23. GUAN, Renpeng, et al. Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: a review. Science of the Total Environment, 2017, vol. 609, p. 1433-1442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.189>

24. GUO, Junyuan; WEN, Xiaoying. Performance and kinetics of benzo (a) pyrene biodegradation in contaminated water and soil and improvement of soil properties by biosurfactant amendment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 207, p. 111292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111292>
25. GUO, Yi-ming, et al. Remediation of Pb-contaminated port sediment by biosurfactant from *Bacillus* sp. G1. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, vol. 27, no 6, p. 1385-1393. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60159-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60159-6)
26. GUO, Junyuan, et al. Removal of benzo (a) pyrene in polluted aqueous solution and soil using persulfate activated by corn straw biochar. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 272, p. 111058. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111058>
27. IBRAHIM, Wael M.; HASSAN, Asad F.; AZAB, Yahia A. Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solution by *Ulva lactuca* activated carbon. *Egyptian journal of basic and applied sciences*, 2016, vol. 3, no 3, p. 241-249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.07.005>
28. IMRAN, Muhammad, et al. Zinc bioavailability in maize grains in response of phosphorous–zinc interaction. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, vol. 179, no 1, p. 60-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jpln.201500441>
29. JIANG, Bo, et al. Impacts of heavy metals and soil properties at a Nigerian e-waste site on soil microbial community. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 362, p. 187-195. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.060>
30. JIANG, Jingjing, et al. Recent progress towards industrial rhamnolipids fermentation: process optimization and foam control. *Bioresource technology*, 2020, vol. 298, p. 122394. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122394>

31. JIN, Yuyao, et al. Effects and mechanisms of microbial remediation of heavy metals in soil: a critical review. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no 8, p. 1336. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app8081336>
32. KAPELLOS, G. E. Microbial strategies for oil biodegradation. En *Modeling of Microscale Transport in Biological Processes*. Academic Press, 2017. p. 19-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804595-4.00002-X>
33. KUMAR, Amrit; RABHA, Jintu; JHA, Dhruva Kumar. Antagonistic activity of lipopeptide-biosurfactant producing *Bacillus subtilis* AKP, against *Colletotrichum capsici*, the causal organism of anthracnose disease of chilli. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, p. 102133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102133>
34. KUMARI, Moni, et al. Evaluation of a biosurfactant producing bacterial strain *Pseudomonas* sp. ISTPY2 for efficient pyrene degradation and landfill soil bioremediation through soil microcosm and proteomic studies. *Bioresource Technology Reports*, 2020, vol. 12, p. 100607. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100607>
35. LAL, Shatrohan, et al. Biosurfactant and exopolysaccharide-assisted rhizobacterial technique for the remediation of heavy metal contaminated soil: an advancement in metal phytoremediation technology. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, vol. 10, p. 243-263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105519>
36. LAMILLA, Claudio, et al. A Pesticide Biopurification System: A Source of Biosurfactant-Producing Bacteria with Environmental Biotechnology Applications. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no 4, p. 624. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040624>
37. LEE, SuMin, et al. Synthesis of environment friendly nonionic surfactants from sugar base and characterization of interfacial properties for detergent application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, vol. 38, p. 157-166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.04.019>
38. LI, Qiqi; ZHONG, Huiqiong; CAO, Yan. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant.

Chemosphere, 2020, vol. 256, p. 127070. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127070>

39. LIAN, Meihua, et al. Profiles and potential health risks of heavy metals in soil and crops from the watershed of Xi River in Northeast China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 169, p. 442-448. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.046>
40. LIU, Guansheng, et al. Advances in applications of rhamnolipids biosurfactant in environmental remediation: a review. *Biotechnology and bioengineering*, 2018, vol. 115, no 4, p. 796-814. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.26517>
41. LIU, Peng, et al. Accumulation and ecological risk of heavy metals in soils along the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea: A comparative study of China and South Korea. *Environment international*, 2020, vol. 137, p. 105519. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105519>
42. LIU, Qi, et al. Production, characterization and application of biosurfactant produced by *Bacillus licheniformis* L20 for microbial enhanced oil recovery. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 307, p. 127193. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127193>
43. LONG, Zhijie, et al. Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, Southwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 420, p. 126638. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126638>
44. LU, Biao, et al. Measurement of cytotoxicity and irritancy potential of sugar-based surfactants on skin-related 3D models. *Toxicology in Vitro*, 2017, vol. 40, p. 305-312. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.02.002>
45. LUNA, Juliana Moura; RUFINO, Raquel Diniz; SARUBBO, Leonie Asfora. Biosurfactant from *Candida sphaerica* UCP0995 exhibiting heavy metal remediation properties. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, vol. 102, p. 558-566. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.010>

46. LIU, Zhifeng, et al. Recent advances in the environmental applications of biosurfactant saponins: a review. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, no 6, p. 6030-6038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.021>
47. MAHAMALLIK, Prateeksha; PAL, Anjali. Degradation of textile wastewater by modified photo-Fenton process: Application of Co (II) adsorbed surfactant-modified alumina as heterogeneous catalyst. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, no 3, p. 2886-2893. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.044>
48. MARTINS, Paola Chaves; MARTINS, Vilásia Guimarães. Biosurfactant production from industrial wastes with potential remove of insoluble paint. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, vol. 127, p. 10-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.11.005>
49. MASINDI, Vhahangwele; MUEDI, Khathutshelo L. Environmental contamination by heavy metals. *Heavy metals*, 2018, vol. 10, p. 115-132. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=dnuQDwAAQBAJ&lpg=PA115&ots=UXphVw9Uhp&lr&hl=es&pg=PA115#v=onepage&q&f=false>
50. MD BADRUL HISHAM, Nurul Hanisah, et al. Production of biosurfactant produced from used cooking oil by *Bacillus* sp. HIP3 for heavy metals removal. *Molecules*, 2019, vol. 24, no 14, p. 2617. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules24142617>
51. MEKWICHAI, Pannawee, et al. Simultaneous biosurfactant-assisted remediation and corn cultivation on cadmium-contaminated soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, vol. 192, p. 110298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110298>
52. MISHRA, Sandhya, et al. Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, p. 126253. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126253>
53. MUTHUSAMY, GOVARTHANAN, et al. Isolation and characterization of a biosurfactant-producing heavy metal resistant *Rahnella* sp. RM isolated from

chromium-contaminated soil. 2017. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s12257-016-0652-0>

54. NOUR, Hamdy E., et al. Contamination and ecological risk assessment of heavy metals pollution from the Shalateen coastal sediments, Red Sea, Egypt. *Marine pollution bulletin*, 2019, vol. 144, p. 167-172. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.056>
55. NOYOLA, José Luis Aguirre, et al. Biosurfactants produced by metal-resistant *Pseudomonas aeruginosa* isolated from *Zea mays* rhizosphere and compost. *RIAA*, 2021, vol. 12, no 1, p. 11. Disponible en: ISSN: 2145-6097
56. OBIRI-NYARKO, Franklin, et al. Assessment of heavy metal contamination in soils at the Kpone landfill site, Ghana: Implication for ecological and health risk assessment. *Chemosphere*, 2021, p. 131007. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131007>
57. PATOWARY, Rupshikha, et al. Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, vol. 129, p. 50-60. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.01.004>
58. QUADRA, Gabrielle R., et al. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 753-757. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.104>
59. RAVINDRAN, Amrudha, et al. Revealing the efficacy of thermostable biosurfactant in heavy metal bioremediation and surface treatment in vegetables. *Frontiers in microbiology*, 2020, vol. 11, p. 222. Disponible en:
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00222>
60. SANTANA-FLORES, Amairani, et al. Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México. *Terra Latinoamericana*, 2020, vol. 38, no 1, p. 67-75. Disponible en: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.430>

61. SANTOS, Danyelle Khadydja F., et al. Biosurfactants: multifunctional biomolecules of the 21st century. *International journal of molecular sciences*, 2016, vol. 17, no 3, p. 401. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms17030401>
62. SARUBBO, L. A., et al. Some aspects of heavy metals contamination remediation and role of biosurfactants. *Chemistry and Ecology*, 2015, vol. 31, no 8, p. 707-723. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02757540.2015.1095293>
63. SARWAR, Nadeem, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 2017, vol. 171, p. 710-721. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>
64. SELVA FILHO, Alexandre Augusto P., et al. Analysis of the surfactant properties of *Eichhornia crassipes* for application in the remediation of environments impacted by hydrophobic pollutants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, p. 102120. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102120>
65. SHABAN, Samy M.; ABD-ELAAL, Ali A. Studying the silver nanoparticles influence on thermodynamic behavior and antimicrobial activities of novel amide Gemini cationic surfactants. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, vol. 76, p. 871-885. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.185>
66. SHAH, Vijendra; DAVEREY, Achlesh. Effects of sophorolipids augmentation on the plant growth and phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 280, p. 124406. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124406>
67. SHEN, Feng, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, vol. 139, p. 254-262. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.044>
68. SRIRAM, Muthu Irulappan, et al. Biofilm inhibition and antimicrobial action of lipopeptide biosurfactant produced by heavy metal tolerant strain *Bacillus*

- cereus NK1. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2011, vol. 85, no 2, p. 174-181. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.02.026>
69. SUN, Wuyang, et al. Optimization of biosurfactant production from *Pseudomonas* sp. CQ2 and its application for remediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*, 2021, vol. 265, p. 129090. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129090>
70. SUN, Wuyang, et al. Isolation and characterization of biosurfactant-producing and diesel oil degrading *Pseudomonas* sp. CQ2 from Changqing oil field, China. *RSC advances*, 2018, vol. 8, no 69, p. 39710-39720. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C8RA07721E>
71. TANG, Jian, et al. Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment. *Chemosphere*, 2017, vol. 189, p. 599-608. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.104>
72. TANG, Jian, et al. Heavy metal removal effectiveness, flow direction and speciation variations in the sludge during the biosurfactant-enhanced electrokinetic remediation. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 246, p. 116918. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116918>
73. TANG, Jian, et al. Removal of heavy metals with sequential sludge washing techniques using saponin: optimization conditions, kinetics, removal effectiveness, binding intensity, mobility and mechanism. *RSC advances*, 2017, vol. 7, no 53, p. 33385-33401. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C7RA04284A>
74. TÓTH, G., et al. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment international*, 2016, vol. 88, p. 299-309. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
75. TU, Chen, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil. *Environment international*, 2020, vol. 137, p. 105576. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105576>

76. WANG, Xia, et al. A novel extracellular enzyme stoichiometry method to evaluate soil heavy metal contamination: Evidence derived from microbial metabolic limitation. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 738, p. 139709. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139709>
77. WOLF, D. C.; GAN, J. Influence of rhamnolipid biosurfactant and Brij-35 synthetic surfactant on 14C-Pyrene mineralization in soil. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 243, p. 1846-1853. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.031>
78. WU, Chuncheng, et al. Feasibility of bioleaching of heavy metals from sediment with indigenous bacteria using agricultural sulfur soil conditioners. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 703, p. 134812. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134812>
79. WU, Yingxin, et al. Field study on the soil bacterial associations to combined contamination with heavy metals and organic contaminants. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 778, p. 146282. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146282>
80. XIANG, Mingtao, et al. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 278, p. 116911. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116911>
81. YANG, Zhihui, et al. Combination of bioleaching by gross bacterial biosurfactants and flocculation: A potential remediation for the heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 2018, vol. 206, p. 83-91. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.166>
82. YANG, Zhihui, et al. Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 301, p. 145-152. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.047>
83. ZAKARI, Sissou, et al. Influence of sulfur amendments on heavy metals phytoextraction from agricultural contaminated soils: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2021, p. 117820. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117820>

84. ZENG, Ling, et al. Quantitative determination of auxiliary information for mapping soil heavy metals and soil contamination risk assessment. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 130, p. 104964. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104964>
85. ZHANG, Junhui, et al. Prevention and mitigation of paraffin deposition by biosurfactant-producing and paraffin-degrading *Bacillus amyloliquefaciens* strain 6-2c. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 335, p. 510-519. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.014>
86. ZHANG, Yan; WANG, Xuemei; JI, Hongbing. Stabilization process and potential of agro-industrial waste on Pb-Contaminated soil around Pb–Zn mining. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 260, p. 114069. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114069>
87. ZHU, Xiaomin, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 227, p. 98-115. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.032>
88. ZHUANG, Mei, et al. Distribution of microbial communities in metal-contaminated nearshore sediment from Eastern Guangdong, China. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 250, p. 482-492. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.041>

ANEXOS

ANEXOS N° 1:

		FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)			
PÁGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN	
TIPO DE INVESTIGACIÓN:			
CÓDIGO:			
PALABRAS CLAVES :			
BACILLUS MÁS EMPLEADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOSURFACTANTES			
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL SUELO CONTAMINADO			
GRUPO DE BACTERIA CON MAYOR PORCENTAJE DE REMOCIÓN	Gram positivas Gram negativas		
RESULTADOS :			
CONCLUSIONES:			

Elaboración propia